

Kompatibilität von Faserseil und mehrlagig bewickelter Seiltrommel

**Entwicklung eines Verfahrens zur Analyse, Berechnung,
Abstimmung und Qualitätsbewertung der Mehrlagenwicklung**

Dissertation

zur Erlangung des Doktorgrades
der Ingenieurwissenschaften

vorgelegt von
Martin Schulze M.Sc.
aus Warburg

genehmigt von der Fakultät für Mathematik/Informatik und Maschinenbau
der Technischen Universität Clausthal

Tag der mündlichen Prüfung
19.12.2019

Dekan

Prof. Dr.-Ing. Volker Wesling

Vorsitzender der Prüfungskommission

Prof. Dr.-Ing. Hubert Schwarze

Hauptberichterstatter

Prof. Dr.-Ing. Armin Lohrengel

Mitberichterstatter

Prof. Dr.-Ing. Wolfram Vogel

Dissertation Technische Universität Clausthal 2019

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	VI
Tabellenverzeichnis	XI
Verwendete Größen und Indizes	XIII
Verzeichnis verwendeter Abkürzungen	XXI
Kurzfassung	XXIII
Abstract	XXVII
1 Einleitung	1
2 Stand der Technik	3
2.1 Geschichtliche Entwicklung von Seilen	3
2.2 Grundlagen von Draht- und Faserseilen	5
2.2.1 Drahtseile	7
2.2.2 Faserseile	9
2.2.3 Seildurchmesser	12
2.3 Grundlagen von Seiltrommeln	20
2.3.1 Seiltrommel in System Seiltrieb – Begriffsdefinition . . .	22
2.3.2 Trommelberechnung	27
2.4 Das Wickelpaket – Zusammenspiel von Seil und Trommel . . .	35
2.4.1 Seillänge auf der Seiltrommel	36
2.4.2 Geometrie der Trommel	38
2.4.3 Wickelqualität	45
2.5 Laser-Profil-Scanner	48
2.6 Ergebnisdarstellung	51

2.7	Forschungsfrage	52
3	Experimentelle Untersuchungen	55
3.1	Untersuchte Seile und Trommeln	56
3.2	Wickelversuche	60
3.2.1	Wickelpaket – Messung und Auswertung	63
3.2.2	Wickelpaket – Ergebnisse	69
3.2.3	Seilquerschnitt – Messung und Auswertung	83
3.2.4	Seilquerschnitt – Ergebnisse aus Wickelversuchen . . .	100
3.3	Querdruckversuche	108
3.3.1	Seilquerschnitt – Ergebnisse aus Querdruckversuchen .	112
3.3.2	Querelastizitätsmodul – Auswertung	129
3.3.3	Querelastizitätsmodul – Ergebnisse	131
3.4	Vergleich experimenteller Ergebnisse	137
3.5	Experimentelle Untersuchungen – Zusammenf. und Bewertung	142
4	Wickelpaketberechnung	143
4.1	Seilquerschnittsdeformation	143
4.2	Modellberechnungen zum Wickelpaket	146
4.2.1	Wickelpaket mit reiner irreversibler Seildeformation . . .	146
4.2.2	Wickelp. mit irreversibler und reversibler Seildeformation	149
4.3	Vergleich experimenteller und analytischer Ergebnisse	152
4.4	Wickelpaket Berechnung – Zusammenfassung und Bewertung .	162
5	Wickelqualität	163
5.1	Visuelle Beurteilung der Wickelqualität	163
5.2	Quantitative Beurteilung der Wickelqualität	165
5.2.1	Quantitative Wickelqualität – Messung und Auswertung .	165
5.2.2	Quantitative Wickelqualität – Ergebnisse	170
5.3	Wickelqualität – Zusammenfassung und Bewertung	184
6	Anwendung der Ergebnisse	185
6.1	Anwendung der Wickelqualitätsanalyse	185
6.2	Optimierung des Systems Seil - Seiltrommel	203
6.2.1	Optimierung der Trommel	203
6.2.2	Optimierung des Seils	207
6.2.3	Ergebnis der Systemoptimierung	210

7 Zusammenfassung und Ausblick auf Anwendungen	211
Literaturverzeichnis	217
A Abbildungen zu Experimenten	229
A.1 Abbildungen zum Seilquerschnitt im Querdruckversuch	229
A.2 Relative Rundheit im Querdruckversuch	233
A.3 Abbildungen zur Wickelqualität	237

Abbildungsverzeichnis

2.1	Seil im geraden und gebogenen Zustand nach [Ver18f]	6
2.2	Reißlänge von Seilen verschiedener Materialien [Din01]	7
2.3	Bruchkraft und Durchmesser verschiedener Seile [Din01]	8
2.4	Aufbau eines Drahtseils	8
2.5	Schlagrichtung von Drahtseilen	9
2.6	Schlaglänge eines geschlagenen Seils	9
2.7	Flechtlänge eines geflochtenen Seils	11
2.8	Faserseil in Mehrlagenwicklung 1 [EM18]	12
2.9	Faserseil in Mehrlagenwicklung 2 [Hat15]	13
2.10	Faserseil im Bergbau [HC17]	13
2.11	Richtiges Messen des Seildurchmessers	14
2.12	Deformiertes Faserseil nach Mehrlagenwicklung [EM18]	16
2.13	Deformiertes Faserseil in Mehrlagenwicklung [LHC11]	18
2.14	Querschnitt mehrlagengeeignetes Faserseil [LHC11]	18
2.15	Optimiertes Faserseil in Mehrlagenwicklung [LHC11]	19
2.16	Trend Deformation Faserseil nach [LHC11]	19
2.17	Trommel mit einer Umwicklung und Koordinatendefinition	21
2.18	Helicoidal- und System-Rillung	21
2.19	Trommeldurchmesser und Rillenabstand	22
2.20	Abwicklung einer System-Rillung	24
2.21	Mehrlagige Trommel mit Rillung und Auflaufkeil nach [Ver18e]	25
2.22	Ablenkwinkel	26
2.23	Ersatzmodell des Wickelpaketes nach [Die71]	28
2.24	Aufstiegsvorgang nach [Mup01]	31
2.25	Allgemeine Darstellung eines Wickelpaketes	39
2.26	Gewickelte Spule [HSF16]	44
2.27	Wickellücken bei einem Faserseil [LSW13]	46
2.28	In Wickelpaket eingeschnittenes Drahtseil [Ver18d]	46

2.29	In Wickelpaket eingeschnittenes Faserseil [Dij18]	47
2.30	Trommelkonzept IMW [SLW18]	48
2.31	Trommelkonzept von Deep Tek [Cra14]	48
2.32	Funktionsprinzip optische Triangulation nach [ER15]	49
2.33	Aufbau Laser-Profil-Scanner [Mic14]	50
2.34	Beispiel Boxplot	51
2.35	Übersicht durchzuführende Untersuchungen	54
3.1	Trommeln für experimentelle Untersuchungen	56
3.2	Seile für experimentelle Untersuchungen	57
3.3	Aufbau Wickelprüfstand	60
3.4	LPS über Trommel angeordnet	61
3.5	LPS um Seil angeordnete	61
3.6	Aufbau Laser-Profil-Scanner über Seiltrommel	63
3.7	Relative Position bezogen auf den Laser-Profil-Scanner	65
3.8	Laser-Profil-Scanner Aufnahmen eines Faserseilwickelpakets	66
3.9	Laser-Profil-Scanner Aufnahmen eines Drahtseilwickelpakets	67
3.10	Laser-Profil-Scanner Aufnahme einer Faserseillage	68
3.11	Laser-Profil-Scanner Aufnahme einer Drahtseillage	68
3.12	3D-Verlauf der Umwicklungen von Faser- und Drahtseil	70
3.13	Wickelverlauf von Faser- und Drahtseil xy -Ebene	72
3.14	Wickelverlauf von Faser- und Drahtseil $y\varphi$ -Ebene	73
3.15	Wickelverlauf von Faser- und Drahtseil $y\varphi$ -Ebene (Detail)	74
3.16	Wickelverlauf von Faser- und Drahtseil $x\varphi$ -Ebene	75
3.17	Wickelhöhe der Lagen von Faser- und Drahtseil	77
3.18	Boxplot Wickelhöhe im PB und KB von Seil 1.3 und Seil 2.1	78
3.19	Boxplot Wickelhöhe im PB und KB von Seil 1.1 und Seil 1.2	80
3.20	Boxplot Wickelhöhe im PB und KB von Seil 1.4 und Seil 1.5	81
3.21	Wickelverlauf eingeschnittenes Faserseil $x\varphi$ -Ebene	82
3.22	Aufbau Laser-Profil-Scanner um Seil	83
3.23	LPS Aufnahme mit Messbereich und Faserseilquerschnitt	85
3.24	Laser-Profil-Scanner Aufnahme Faserseilquerschnitt	85
3.25	Relative Rundheit in Abhängigkeit der Anzahl der Seilquerschnitte	86
3.26	Ausgewerteter Seildurchmesser	86
3.27	Umfang und Fläche von Seilen	87
3.28	Ellipse mit Durchmessern und Halbachsen	89
3.29	Ellipse mit verdrehten Durchmessern	90

3.30	Theoretisch maximal deformierte Seilquerschnitte in PB und KB .	94
3.31	Vergleich von Sechseck und Ellipse	96
3.32	Ellipsität von Rechteck und Sechseck	97
3.33	Ellipsen gleicher Fläche und unterschiedlicher relativer Rundheit	99
3.34	Verlauf Seildurchmesser in Abhängigkeit der relativen Rundheit .	99
3.35	Verlauf Seildurchmesser im Wickelversuch von Seil 1.3	100
3.36	Verlauf Seildurchmesser je Lage im Wickelversuch von Seil 1.3 .	101
3.37	Boxplot Seildurchmesser je Lage in Wickelversuchen von Seil 1.3	102
3.38	Boxplot relative Rundheit je Lage in Wickelversuchen von Seil 1.3	102
3.39	Relative Rundheit von Faserseilen je Lage in Wickelversuchen . .	103
3.40	Durchmesser und Ellipsität Wickelversuche	105
3.41	Relative Rundheit, Konvexität und Zirkularität Wickelversuche . .	106
3.42	Querdruckprüfstand - Aufbringung der Seilkraft	108
3.43	Querdruckprüfstand - Aufbringung der Querkraft	109
3.44	Prinzipieller Aufbau des Querdruckversuchs	109
3.45	Messbereich Seilquerschnittsmessung im Querdruckversuch . .	112
3.46	Durchmesser vor und nach Querkraft von Seil 1.3 und Seil 2.1 . .	114
3.47	Durchmesser vor und nach Querkraft von Seil 1.1 und Seil 1.2 . .	115
3.48	Durchmesser vor und nach Querkraft von Seil 1.4 und Seil 1.5 . .	116
3.49	Durchmesser vor und nach Querkraft von Seil 2.2 und Seil 2.3 . .	117
3.50	Durchmesser im Querdruckversuch Seil 1.3 und Seil 2.1	119
3.51	Relative Rundheit im Querdruckversuch Seil 1.3 und Seil 2.1 . .	120
3.52	Durchmesser und Ellipsität Querdruckversuche	122
3.53	Relative Rundheit, Konvexität und Zirkularität Querdruckversuche	123
3.54	$d(R_{rel})$ im Querdruckversuch von Seil 1.3 und Seil 2.1	125
3.55	$d(R_{rel})$ im Querdruckversuch von Seil 1.1 und Seil 1.2	126
3.56	$d(R_{rel})$ im Querdruckversuch von Seil 1.4 und Seil 1.5	127
3.57	$d(R_{rel})$ im Querdruckversuch von Seil 2.2 und Seil 2.3	128
3.58	Zusammenhang Durchmesser und Kraft im Querdruckversuch . .	129
3.59	Querelastizitätsmodul für konstante Seilkraft	131
3.60	Querelastizitätsmoduln Seil 1.2 und Seil 1.3	133
3.61	Querelastizitätsmoduln Seil 1.4 und Seil 1.5	134
3.62	Querelastizitätsmoduln Seil 1.1 und Seil 2.2	135
3.63	Querelastizitätsmoduln Seil 2.3 und Seil 2.1	136
3.64	Vergleich R_{rel} Querdruck- und Wickelversuch Seil 1.1	137
3.65	Vergleich R_{rel} Querdruck- und Wickelversuch Seil 1.2	138
3.66	Vergleich R_{rel} Querdruck- und Wickelversuch Seil 1.3	138

3.67 Vergleich R_{rel} Querdruck- und Wickelversuch Seil 1.4	139
3.68 Vergleich R_{rel} Querdruck- und Wickelversuch Seil 1.5	139
3.69 Vergleich R_{rel} Querdruck- und Wickelversuch Seil 2.2	140
3.70 Vergleich relative Rundheit Querdruck- und Wickelversuch	141
4.1 Ellipse in PB und KB unterschiedlich deformiert	145
4.2 Höhenunterschied benachbarter Lagen im PB der Trommel	146
4.3 Höhenunterschied benachbarter Lagen im KB der Trommel	149
4.4 Seilverlauf Modell mit irreversibler Deformation	150
4.5 Weiterleitung Querkraft im PB und KB	151
4.6 Wickelhöhe im Modell und im Vergleich zum Experiment	154
4.7 Relative Wickelhöhe Experiment und Modelle Seil 1.3	155
4.8 Relative Wickelhöhe Experiment und Modelle Seil 2.1	156
4.9 Relative Wickelhöhe Experiment und Modelle Seil 1.1	157
4.10 Relative Wickelhöhe Experiment und Modelle Seil 1.2	158
4.11 Relative Wickelhöhe Experiment und Modelle Seil 1.4	159
4.12 Relative Wickelhöhe Experiment und Modelle Seil 1.5	160
4.13 Füllfaktor Wickelpaket	162
5.1 Fotos Wickelpaket Seile 1.1 bis 1.5 fünfte Lage	164
5.2 Faserseilwickelpaket 1.3 mit Soll-Ist-Vergleich	166
5.3 Wickelposition Soll-Ist-Vergleich	167
5.4 Faserseilwickelpaket mit Soll-Ist-Vergleich mit Bewertung	168
5.5 Heatmap Rillungsqualität Trommel 1	171
5.6 Boxplot Rillungsqualität Trommel 1	172
5.7 Boxplot Rillungsqualität Trommel 2.1	172
5.8 Heatmap Wickelqualität Seil 1.3	174
5.9 Boxplot Wickelqualität Seil 1.3	175
5.10 Wickelqualität Seil 2.1	177
5.11 Wickelqualität Seil 1.1	178
5.12 Wickelqualität Seil 1.2	179
5.13 Wickelqualität Seil 1.4	181
5.14 Wickelqualität Seil 1.5	182
5.15 Wickelqualität aller untersuchten Seile	183
5.16 Wickelqualität aller untersuchten Seile bereinigt	184
6.1 WQ Seil 2.1 verschiedener Wickelszenarien nach Richtungen	187

6.2	<i>WQ</i> Seil 2.1 verschiedener Wickelszenarien nach Lagen	188
6.3	Ausgesuchte Wickelpositionen zur Ermittlung der Wickelqualität	189
6.4	<i>WQ</i> verschiedene Wickelszenarien Trommelmitte $x - \varphi$ -Ebene	191
6.5	<i>WQ</i> verschiedene Wickelszenarien Trommelmitte $y - \varphi$ -Ebene	193
6.6	<i>WQ</i> versch. Wickelszenarien neben Bordscheibe $x - \varphi$ -Ebene	194
6.7	<i>WQ</i> versch. Wickelszenarien neben Bordscheibe $y - \varphi$ -Ebene	195
6.8	Boxplot <i>WQ</i> verschiedene Wickelszenarien Trommelmitte 1	198
6.9	Boxplot <i>WQ</i> verschiedene Wickelszenarien Trommelmitte 2	199
6.10	Boxplot <i>WQ</i> verschiedene Wickelszenarien neben Bordscheibe 1	200
6.11	Boxplot <i>WQ</i> verschiedene Wickelszenarien neben Bordscheibe 2	201
6.12	Für Faserseil angepasste Trommeloberfläche	204
6.13	An Faserseil angepasste Oberflächengeometrie Trommel 2.2	205
6.14	Wickelpaket Seil 2.2 auf Trommel 2.2	205
6.15	Relative Wickelhöhe Experiment und Modelle Seil 2.2	206
6.16	Anpassung Seildurchmesser an Querschnittsdeformation	209
6.17	Faserseil passt nicht zur Trommel	210
7.1	Auslegung von Seilen und Trommeln	212
A.1	Durchmesser im Querdruckversuch Seil 1.1 und Seil 1.2	230
A.2	Durchmesser im Querdruckversuch Seil 1.4 und Seil 1.5	231
A.3	Durchmesser im Querdruckversuch Seil 2.2 und Seil 2.3	232
A.4	Relative Rundheit im Querdruckversuch Seil 1.1 und Seil 1.2	234
A.5	Relative Rundheit im Querdruckversuch Seil 1.4 und Seil 1.5	235
A.6	Relative Rundheit im Querdruckversuch Seil 2.2 und Seil 2.3	236
A.7	Heatmap Wickelqualität Seil 1.1	238
A.8	Heatmap Wickelqualität Seil 1.2	239
A.9	Heatmap Wickelqualität Seil 1.4	240
A.10	Heatmap Wickelqualität Seil 1.5	241
A.11	Heatmap Wickelqualität Seil 2.1	242

Tabellenverzeichnis

Tab. 2.1: Normenauswertung zum Wickelpaket	40
Tab. 3.1: Trommeln für experimentelle Untersuchungen	58
Tab. 3.2: Seile für experimentelle Untersuchungen	58
Tab. 3.3: Durchgeführte Experimente	59
Tab. 3.4: Parameter Wickelversuche	62
Tab. 3.5: Variablen zur Beschreibung von Seilquerschnitten	91
Tab. 3.6: Versuchsmatrix Querdruckversuche	111
Tab. 3.7: Parameter Seilquerschnitt im Querdruckversuch	124
Tab. 6.1: Rillungsverhältnis Wickelversuche	207

Verwendete Größen und Indizes

Lateinische Buchstaben

Zeichen	Einheit	Bedeutung
A	m	Abstand Trommel Seilscheibe
A_{Ell}	m^2	Fläche einer Ellipse
A_{kH}	m^2	Fläche des Seilquerschnitts nach konvexer Hülle
A_{LPS}	m^2	Fläche des Seilquerschnitts nach äußerer Kontur
A_{real}	m^2	tatsächliche Fläche des Draht- oder Faserseilquerschnitts
a	m	großer Halbachse einer Ellipse
$a_{1,2}$	m	Abstand Sender Empfänger bei optischer Triangulation
a_{F}	-	Flächenexponent zur Beschreibung der Veränderung des Seilquerschnitts
$a_{\text{H,S}}$	-	Korrekturwert zur Berücksichtigung von Helicoidal- oder Systemrillung bei der Berechnung der Seillängen
a_{max}	-	Exponent zur Beschreibung von d_{max}
a_{min}	-	Exponent zur Beschreibung von d_{min}
a_{o}	-	oberer Anrainer
a_{T}	m	mittlerer Radius des Trommelmantels
a_{u}	-	unterer Anrainer
$abst_{\text{xx}}$	m	Abstand zwischen Soll- und Ist-Position gegebenenfalls in Richtung xx
b	m	kleine Halbachse einer Ellipse
$b_{1,2}$	m	Abstand zum Messobjekt bei optischer Triangulation

Fortsetzung auf Folgeseite

Zeichen	Einheit	Bedeutung
D	m	Durchmesser Trommel (Trommeloberfläche)
D_B	m	Durchmesser Bordscheibe
d	m	Seildurchmesser (rund mit Nenndurchmesser)
d_M	m	Menge gemessener Seildurchmesser eines Seilquerschnitts
d_{\max}	m	größter Seildurchmesser eines Seilquerschnitts
d_{mean}	m	mittlerer Seildurchmesser eines Seilquerschnitts
d_{\min}	m	kleinster Seildurchmesser eines Seilquerschnitts
d_n	m	Seilnenndurchmesser
d_r	m	Vergleichsdurchmesser eines theoretisch runden Seils
d_T	-	Anzahl Trommelumdrehungen bei vollständiger Be- wicklung
d_{xx}	m	Seildurchmesser unter Berücksichtigung von xx (auch mehrere möglich)
E_{SL}	Pa	Längselastizitätsmodul
$E_{SL,i}$	Pa	Längselastizitätsmodul der Lage i
E_{SQ}	Pa	Querelastizitätsmodul
$E_{SQ,i}$	Pa	Querelastizitätsmodul der Lage i
Ell_{xx}	-	Ellipsität unter Berücksichtigung von xx (auch meh- rere möglich)
F_L	N	Seilkraft
F_Q	N	Querkraft
$F_{Q,KB}$	N	Querkraft im Kreuzungsbereich
$F_{Q,PB}$	N	Querkraft im Parallelbereich
F_φ	-	Faktor zur Berechnung der kontinuierlichen Wickel- höhe bei rundem Seilquerschnitt
$\Delta F_{L,k}$	N	Seilkraftdifferenz durch Entlastung in Lage k
f_L	-	Längskraftfaktor
f_{real}	-	Füllfaktor Draht- oder Faserseil
f_W	-	Füllfaktor des Wickelpakets
e	m	Rillenabstand

Fortsetzung auf Folgeseite

Zeichen	Einheit	Bedeutung
H	m	Schlaglänge oder Flechtlänge
H_{theo}	m	Theoretische Wickelhöhe bei Spulen mit orthozyklischer Wicklung
H_{wild}	m	Wickelhöhe bei Spulen mit wilder Wicklung
h	m	Mantelwandstärke
K	-	Konvexität
K_{φ}	N	Kontaktkraft im Kreuzungsbereich in Abhängigkeit der Trommelposition
$k_{Q,k}$	-	Querspannungsverhältnis in Lage k
L	m	Trommellänge zwischen den Innenseiten der Bordscheiben
L_S	m	Seillänge
LW_T	-	Lagenwechsel auf der Trommel
LW_P	-	Lagenwechsel an der beobachteten Position
l	-	Anzahl Lagen auf der Trommel
l_{mess}	m	Messlänge
O	-	Orthogonalität
O_{rel}	-	relative Ovalität
P	m	Umwicklungsposition
$P_{\text{Ist,xx}}$		Ist-Position der Umwicklung in Richtung xx
P_{rel}	-	relative Wickelposition
P_x	m	Wickelposition
$P_{x,\text{rel}}$	-	relative Wickelposition
$P_{y,k}$	m	Wickelhöhe in Lage k
$P_{y,\text{rel}}$	-	relative Wickelhöhe
P_{xx}	N	Radialkraft im Bereich xx
p_k	Pa	Druckanteil der Lage k
$p_{T,n}$	Pa	Druck auf den Mantel an Stelle n
q_1	-	unteres Quartil
q_2	-	Median
q_3	-	oberes Quartil
R_{xx}	N	Axialkraft auf Bordscheibe im Bereich xx

Fortsetzung auf Folgeseite

Zeichen	Einheit	Bedeutung
R_k	N	Bordscheibenkraft in Lage k gesamt
R_{xx}	N	Axialkraft auf Bordscheibe im Bereich xx
$R_{rel,k}$	-	relative Rundheit in Lage k
r	m	Wickelradius allgemein
r_{xx}	m	Wickelradius unter Berücksichtigung von xx (auch mehrere möglich)
r_i	m	Wickelradius Mitte Seil in Lage i
$r_{O,i}$	m	Wickelradius in Lage i an der Wickelpaketoberfläche
$r q_{xx}$	-	Rillungsqualität an bestimmter Position gegebenfalls nach Richtung xx
Δr_B	m	Radiusdifferenz zwischen Oberkante Seilpaket und Außendurchmesser Bordscheibe
s	m	Kantenlänge des quadratischen Ersatzquerschnitts
U_{Ell}	m	Umfang einer Ellipse
U_{kH}	m	Umfang eines Seilquerschnitts bei Berücksichtigung der konvexen Hülle
U_{LPS}	m	Umfang eines mit den Laser-Profil-Scanner aufgenommenen Seilquerschnitts
U_{real}	m	tatsächlicher Umfang eines Seilquerschnitts
u	-	Anzahl Umwicklungen auf der Trommel
$v_x x$	-	Rillungsverhältnis mit Angabe des Bezugsdurchmessers xx
v_S	m/s	Seilgeschwindigkeit
WQ	-	Wickelqualität
WQ_l	-	Wickelqualität je Lage
$WQ_{l,u}$	-	Wickelqualität je Lage und Umwicklung
$WQ_{l,u,d}$	-	Wickelqualität je Lage, Umwicklung und Umdrehung
$w_{i,j}$	m	Absenkung der Windung in Lage i an Position j
$w_{T,j}$	m	Absenkung der Trommel an Position j

Fortsetzung auf Folgeseite

Zeichen	Einheit	Bedeutung
wq_{xx}	-	Wickelqualität an bestimmter Position gegebenenfalls nach Richtung xx
x	m	axiale Trommelrichtung
x_{Ell}	m	Punkt einer Ellipse in x -Richtung
$x_{i,n}$	Pa	Druckanteil der Lage i an Stelle n
$\Delta x(\varphi)$	m	axiale Seilbewegung in Abhängigkeit der Trommeldrehung
y	m	radiale Trommelrichtung
y_{Ell}	m	Punkt einer Ellipse in y -Richtung
$y_{\text{KB},k}$	m	Wickelhöhe der Lage k im Kreuzungsbereich
$y_k(\varphi)$	m	kontinuierliche Wickelhöhe der Lage k in Abhängigkeit der Winkelposition
$y_{\text{PB},k}$	m	Wickelhöhe der Lage k im Parallelbereich
Δy_{KB}	m	Höhendifferenz zwischen zwei Umwicklungen benachbarter Lagen im Kreuzungsbereich
Δy_{PB}	m	Höhendifferenz zwischen zwei Umwicklungen benachbarter Lagen im Parallelbereich
Δy_{rund}	m	Höhendifferenz zwischen zwei Umwicklungen benachbarter Lagen im Parallelbereich bei rundem Seilquerschnitt
Z_{xx}	-	Zirkularität unter Berücksichtigung von xx

Griechische Buchstaben

Zeichen	Einheit	Bedeutung
α	°	Keilwinkel des Seils im Übergang zwischen zwei Lagen
α_0	°	Keilwinkel im Parallelbereich (PB)
$\alpha_{1,2}$	m	Winkel Reflexion bei optischer Triangulation

Fortsetzung auf Folgeseite

Zeichen	Einheit	Bedeutung
γ	°	Winkel zwischen dem gemessenen maximalen und minimalen Durchmesser eines Seilquerschnitts
δ	°	Ablenkwinkel des Seils auf der Trommel
δ_{\max}	°	maximaler Ablenkwinkel des Seils auf der Trommel
ε	-	Fehler bei Abschätzung des Umfangs einer Ellipse
φ	°	tangentiale Trommelrichtung, Drehwinkel der Trommel
φ_{KB}	°	Winkel Kreuzungsbereich
φ_{PB}	°	Winkel Parallelbereich
μ	-	Reibwert zwischen Seil und Trommel
μ_{s}	-	Reibwert zwischen den Umwicklungen des Seils
σ_{L}	Pa	Längsspannung im Seil
σ_{Q}	Pa	Querspannung im Seil

Indizes

Zuvor genannten Größen, die mit dem Index *xx* gekennzeichnet wurden können in der Arbeit verschiedenen Indizes zugeordnet werden, die Bedeutung der jeweiligen Indizes ergibt sich aus der nachfolgenden Tabelle.

Index	Bedeutung
A	bezogen auf die Fläche
d_{\max}	bezogen auf den maximalen Seildurchmesser
d_n	bezogen auf den Nenndurchmesser
Ell	bezogen auf eine Ellipse
i	Laufindex Lagen
j	Laufindex Umwicklungen
k	- Index exemplarische Lage
KB	bezogen auf den Kreuzungsbereich
kH	bezogen auf die konvexe Hülle

Fortsetzung auf Folgeseite

Index	Bedeutung
Kr	bezogen auf einen Kreis
LPS	bezogen auf mit den Laser-Profil-Scannern (LPS) aufgenommene Punkte des Seilquerschnitts
Med	bezogen auf den Median
n	Index exemplarische Umwicklung
PB	bezogen auf den Parallelbereich
Sek	bezogen auf die Sekante
U	bezogen auf den Umfang
φ	bezogen auf die Trommeldrehung
x	bezogen auf Richtung x
y	bezogen auf Richtung y

Mathematische Symbole

Symbol	Bedeutung
$f()$	allgemeine Funktion

Verzeichnis verwendeter Abkürzungen

Abkürzung	Bedeutung
AiF	Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“
HMPE	High-Modulus Polyethylen
HPPE	High-Performance Polyethylen
IMW	Institut für Maschinenwesen
LPS	Laser-Profil-Scanner
MBF	Mindestbruchkraft
PB	Parallelbereich
KB	Kreuzungsbereich
ZIM	Zentrales Innovationsprogramm Mittelstand

Kurzfassung

Hochfestfaserseile haben Eigenschaften, die Vorteile gegenüber Drahtseilen bieten können. Durch ihr geringeres Gewicht bei ähnlichem Durchmesser und ähnlicher Tragkraft können technische Grenzen hin zu höheren Lasten oder größeren Hubhöhen verschoben werden. Andere Aspekte sind Einsparungen bei der Antriebsenergie oder ein leichteres Handling der Seile.

Demgegenüber stehen andersartig ausgeprägte Eigenschaften der Faserseile, die einen Einsatz in unveränderten Seiltrieben erschweren oder unmöglich machen.

Die Grundlagen von Draht-, Faserseilen und Trommeln werden in Kapitel 2 zusammengefasst. Es wird dort das Zusammenspiel von Seil und Trommel und das sich ergebende Wickelpaket beschrieben. Dabei zeigt sich, dass es eine Reihe von Anforderungen an die Trommelkonstruktion bezüglich der geometrischen Dimensionierung in Form von Normen und Richtlinien gibt. Jedoch fehlen an dieser Stelle konkrete Hinweise zur Berechnung des zu speichernden Wickelpakets. Bei Drahtseilen kann diese Lücke durch die Annahme eines kreisrunden Seilquerschnitts und darauf aufbauende Berechnungen geschlossen werden. Bei Faserseilen geht das nicht. Entweder müssen aufwendige Experimente unternommen werden oder es bleibt Unsicherheit bezüglich des sich einstellenden Wickelpakets. In jedem Fall wird durch die Unklarheit Potenzial für Leichtbau und/oder platzsparende Konstruktionen verschenkt und die Anwendung in sicherheitsrelevanten Bereichen verbietet sich.

Aus diesem Mangel wird die Forschungsfrage nach Kompatibilität von Faserseil und Trommel und deren optimaler Nutzung als gesamtes System abgeleitet. Die dafür zu lösenden ersten beiden Aufgaben sind die Beschreibung des Wickelpaketes und die des Seilquerschnitts bei sich stark deformierenden Seilen. Dies geschieht experimentell und mathematisch-analytisch. Vergleicht man dann den experimentellen Verlauf mit der sich aus der Berechnung er-

gebenden Sollvorgabe, kann die sich tatsächlich einstellende Wickelqualität berechnet werden. Die Werkzeuge für die Messung, die Berechnung der Sollvorgabe und den Vergleich werden in dieser Arbeit entwickelt. Mit den beiden zuletzt genannten Punkten sind auch die weiteren Aufgaben gelöst.

Im experimentellen Teil der Arbeit in Kapitel 3 wird zuerst das Vorgehen vorgestellt, mit dem erstmalig eine detaillierte mathematische Beschreibung des Wickelpaketes und der einzelnen Umwicklungen auf der Trommel vorgenommen wird. Zu diesem Zweck werden mithilfe von Laser-Profil-Scannern (Laser-Profil-Scanner (LPS)) Aufnahmen der Oberfläche der Trommel und des Wickelpaketes gemacht. Dadurch lassen sich für den aufgenommenen Bereich nach der Auswertung die Positionen der einzelnen Umwicklungen räumlich beschreiben. Dies ist der Ist-Verlauf der Umwicklungen.

Weiterhin wird im experimentellen Teil der am Institut für Maschinenwesen (IMW) etablierte Querdruckversuch an Seilen dahingehend erweitert, dass neben einer Aussage über das elastische reversible Deformationsverhalten auch eine Aussage über das irreversible Deformationsverhalten gemacht werden kann. Sowohl der bewährte Kennwert des Querelastizitätsmoduls als auch der neue Kennwert der relativen Rundheit werden lastabhängig als Funktion der Seil- und der Querkraft angegeben.

Für die konkrete Nutzung der irreversiblen Deformation für ein Seil wird neben der relativen Rundheit in Abhängigkeit der Lasten auch der sich einstellende maximale und minimale Seildurchmesser als Funktion der relativen Rundheit angegeben. Damit ist es der Konstrukteurin oder dem Konstrukteur möglich aus den genannten Kennwerten den sich lastabhängig einstellenden Seilquerschnitt zu berechnen.

Die Wickelpaketberechnung baut auf der bekannten Berechnung der Trommelbelastungen auf. Abweichend davon hat sie jedoch das Ziel, den Verlauf der Umwicklungen im mehrlagigen Wickelpaket zu berechnen. Durch die Nutzung der experimentell ermittelten Kennwerte der relativen Rundheit und des Querelastizitätsmoduls aus Kapitel 3 wird der Soll-Verlauf der Umwicklungen bestimmt. Anhand des Vergleichs der Wickelhöhen kann eine gute Übereinstimmung zwischen Berechnungsmodell und Experiment festgestellt werden.

Der Soll- und der Ist-Verlauf der Umwicklungen werden in Kapitel 5 zusammengeführt. Aus dem Vergleich wird erstmalig ein Kriterium zur quantitativen

Bewertung der Mehrlagenwicklung definiert. Mit diesem Kriterium werden die durchgeführten Wickelversuche und damit die Kompatibilität der eingesetzten Seile zur Trommel bewertet.

Das abschließende Kapitel 6 zeigt die Möglichkeiten zur konkreten Anwendung der Ergebnisse. Zum einen wird an einem Beispiel deutlich gemacht, wie das Werkzeug der Wickelqualitätsanalyse zur Untersuchung und zum Vergleich spezieller Wickelszenarien eingesetzt werden kann. Zum anderen wird erläutert, wie aus dem Vergleich einer Trommelgeometrie mit den charakteristischen Seilgrößen eine Aussage zur Kompatibilität abgeleitet wird.

Der Nutzen der vorgestellten Werkzeuge liegt in verschiedenen Bereichen. Die Entwicklung neuer oder die Anpassung bestehender Seiltriebe kann durch die vorherige Berechnung verkürzt werden. Durch ihren Einsatz können Systeme vor der experimentellen Erprobung berechnet werden. Die Erprobungszeit wird damit verkürzt. In der Erprobung besteht durch die objektive Beurteilungsgrundlage die Möglichkeit einer zielgerichteten Verbesserung. Die Wickelqualitätsanalyse kann zudem zur Überwachung zum Einsatz kommen. Beispielsweise können in sicherheitstechnisch relevanten Anwendungen Wickelfehler direkt beim Auftreten erkannt werden. Ein Weiterbetrieb mit möglicherweise katastrophalen Folgen würde so verhindert.

Abstract

High-strength fibre ropes have properties that can offer advantages over wire ropes. Due to their lower weight and similar diameter and load capacity, technical limits can be shifted to higher loads or higher lifting heights. Additional aspects are savings of drive energy or easier handling of the ropes.

On the opposite side, there are other distinctive properties of fibre ropes which make it difficult or impossible to use in unchanged rope drives.

The basics of wire ropes, fibre ropes and drums are summarized in chapter 2. The interaction of rope and drum and the resulting winding package are discussed. On the one hand, there are a number of requirements on the drum design with regard to geometric dimensioning in the form of standards and guidelines. On the other hand, there is a lack of concrete information on the calculation of the winding package to be stored. Concerning wire ropes, this gap can be closed by assuming a circular rope cross-section and calculations based on this. Concerning fibre ropes, either elaborate experiments have to be carried out or an uncertainty remains with regard to the resulting winding package. Due to the uncertainty, potential for lightweight construction and/or space-saving constructions is wasted in any case.

The research question about compatibility of fibre ropes and drums and their optimal use as an overall system is derived from this lack of information. Two tasks to be solved are the description of the winding package and the rope cross section for strongly deforming ropes. The experimental course can be compared with the analytically calculated nominal course. The actual winding quality can be calculated by comparison. Tools for measurement, calculation of the nominal course and comparison are developed in this dissertation. They also solve the following tasks.

Chapter 3 describes winding experiments and their evaluation. For the first time there is developed a detailed mathematical description of the winding package

and the individual windings on the drum. For this purpose, laser profile scanners (LPS) are used to take images of the surface of the drum and the winding package. The positions of the individual windings of the recorded area can be described spatially after the evaluation. This is the actual course of the windings.

Further experiments are the investigations of transverse pressure behaviour established at the Institute of Mechanical Engineering (IMW). The lateral modulus of elasticity is determined for the ropes investigated. The elastic reversible deformation is determined from this. In addition, the irreversible deformation behaviour is also investigated. As a result, the relative roundness is determined. Both characteristic values are finally given as a function of the rope force and the transverse force.

For the concrete calculation of the irreversible deformation of a fibre rope, the maximum and minimum rope diameters are decisive. For this purpose, the maximum and minimum diameters are given as a function of relative circularity. The engineer can thus calculate the load-dependent rope cross section.

The calculation of the winding package is based on the well-known calculation of the drum loads. The aim, however, is to calculate the course of the windings in the multi-layer winding package in deviation from this. The calculation of the nominal course uses the experimentally detected characteristic values of the relative circularity and the lateral elasticity modulus (chapter 3). The agreement of calculation model and experiment can be determined by the winding height.

Nominal and actual course of the windings are combined in chapter 5. For the first time the criterion for the quantitative evaluation of the multi-layer winding is defined here. This criterion is used to evaluate the winding tests carried out and thus the compatibility of the ropes used with the drum.

In the final chapter 6 possibilities for the concrete application of the results are shown. On the one hand, an example shows how the tool of the winding quality analysis can be used for the investigation and comparison of special winding scenarios. On the other hand, there is an explanation how a statement on compatibility is derived from the comparison of drum geometry with the characteristic rope sizes.

The benefits of the tools presented are to be found in various areas. The de-

velopment of new or the adaptation of existing rope drives can be shortened by the previous calculation. By using them, systems can be calculated before experimental testing. This shortens the testing time. The objective evaluation basis enables a specific improvement during testing. The winding quality analysis can also be used for monitoring. Winding faults can, for example, be detected directly when they occur in safety-relevant applications. Catastrophic consequences due to continued operation would thus be prevented.

Danksagungen

An dieser Stelle möchte ich mich ganz herzlich bei allen Menschen bedanken, die mir die Erstellung dieser Arbeit ermöglicht haben.

Meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr.-Ing. Armin Lohrengel möchte ganz besonders für die Möglichkeit der Bearbeitung des Themas und der Freiheit bei der Bearbeitung danken. Und für die Unterstützung durch Anregungen und Rat.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Wolfram Vogel danke ich für die Übernahme des Koreferats verbunden mit der Diskussion über Seiltriebe.

Außerdem möchte ich denen danken, die durch die Förderung der Forschung die Bearbeitung ermöglicht haben, das ist zum einen die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ (AiF) für die Förderung des Verbundprojekt „Innovatives Wickelsystem für Seile aus Synthesefasern“ und den Projektpartnern für die gemeinsame Arbeit, zum anderen den verschiedenen Projektpartnern in Industrieprojekten für die gute Zusammenarbeit und die interessanten Fragestellungen.

Bedanken möchte ich mich auch bei allen Kollegen am Institut für Maschinenwesen (IMW) für eine spannende Zeit und eine gute Zusammenarbeit: Den wissenschaftlichen Kollegen für die Diskussionen und die Unterstützung, den Kollegen aus der Werkstatt für die Unterstützung in der mechanischen und elektrischen Umsetzung der Aufbauten zur Durchführung der Experimente und den Kolleginnen aus dem organisatorischen Bereich für die organisatorischen Hilfen. Besonders möchte ich mich bei Dipl.-Ing. Martina Wächter für die Zusammenarbeit an Seilen und Trommeln bedanken.

Auch allen Studentinnen und Studenten, die mich durch die Bearbeitung von Abschlussarbeiten oder durch ihre Hiwi-Tätigkeit bei der Erstellung dieser Arbeit unterstützt haben, möchte ich mich bedanken.

Abschließend gilt mein Dank meiner ganzen Familie für die Unterstützung wäh-

rend des gesamten Studiums und bei der Erstellung der Arbeit.

1 Einleitung

Hochleistungsfaserseile haben gegenüber Drahtseilen bestimmte Vorteile. Wesentlich ist das geringere Gewicht bei vergleichbarem Durchmesser und vergleichbarer Tragkraft. Daraus können durch Faserseile Einsparungen bei der Antriebsenergie erzielt werden. Außerdem sind sie leichter von Hand zu bewegen.

Jedoch gibt es ungeklärte Fragen bezüglich des Einsatzes der Hochleistungsfaserseile. Bei Drahtseilen gibt es abgesicherte Erkenntnisse zu ihrem sicheren Einsatz. Zur Erkennung der Ablegereife, dem Ende des sicheren Einsatzes, gibt es zum Beispiel ein großes Erfahrungswissen und wissenschaftliche Untersuchungen. Anhand von sichtbaren Drahtbrüchen kann aufgrund dieses Wissens auch auf den Zustand im Seilinneren geschlossen werden. Zudem gibt es weitere Verfahren zur Erkennung der Ablegereife wie die zerstörungsfreie Seilprüfung durch Magnetinduktion. Auf Faserseile können diese Verfahren weder direkt angewendet werden noch sind sie einfach zu übertragen.

Weiterhin können Faserseile aufgrund ihrer andersartig ausgeprägten Eigenschaften nicht einfach in unveränderten für Drahtseile gestalteten Seiltrieben zum Einsatz kommen. Auf mehrlagig bewickelten Seiltrommeln kommt es vermehrt zu schlechtem Wickelverhalten. Dies kann in der Folge zum Versagen des Seiltriebs mit eventuell katastrophalen Folgen führen. Die anders ausgeprägten Eigenschaften sind beispielsweise die Elastizitätsmoduln in Längs- und in Querrichtung und das Deformationsverhalten des Seilquerschnitts bei Querbelaastung beim Lauf über Seilscheiben oder auf eine Seiltrommel. Neben der Kenntnis der genauen Ausprägung dieser Eigenschaften ist das daraus resultierende Verhalten der Seile zu erforschen. Die wesentliche Problematik ergibt sich aus der Anwendung neuartiger Seile auf unveränderten mehrlagig bewickelten Seiltrommeln.

Das Ziel dieser Arbeit ist es, erstmalig ein System zur detaillierten Erfassung

des Wickelverhaltens von Seilen auf mehrlagig bewickelten Seiltrommeln zu schaffen. Weiterhin soll die Ermittlung der Seileigenschaften dahingehend erweitert werden, dass durch das Wissen des Deformationsverhaltens des Seilquerschnitts eine vorausgehende Berechnung des sich aufbauenden Wickelpakets ermöglicht wird.

Mit der Bereitstellung dieser beiden Werkzeuge kann sowohl der Istzustand des Wickelverlaufs des Seils im mehrlagigen Wickelpaket festgestellt als auch eine Soll-Position berechnet werden.

Damit lässt sich ein drittes Werkzeug schaffen, denn mit dem Vergleich von Soll- und Ist-Position steht dann erstmalig eine Methode zur Verfügung, mit der die Wickelqualität des mehrlagigen Wickelpakets quantitativ beurteilen werden kann.

2 Stand der Technik

In diesem Kapitel werden Grundlagen zu Seilen, Trommeln und deren Zusammenspiel im Seiltrieb dargestellt. Ausgehend von einer Recherche über Angaben zum Wickelpaket von mehrlagig gewickelten Seilen in der Normung und der Literatur werden die Forschungsfragen zu diesem Thema definiert.

2.1 Geschichtliche Entwicklung von Seilen

Seile werden schon sehr lange von Menschen benutzt und hergestellt. Hinweise dafür gibt es in Form von Darstellungen aus der Eiszeit und Abdrücken in Ton und organischen Materialien. Außerdem deuten Funde von Lochstäben darauf hin, dass bereits vor 40 000 Jahren Seile hergestellt wurden. Ein bei Ausgrabungen gefundener Lochstab diente vermutlich zur Herstellung von Seilen oder Schnüren [CM16].

Das Alter der ältesten Funde von menschengemachten Seilen wird auf 10 000 Jahre geschätzt. Sie gehören zu Fischernetzen, die in Finnland gefundenen wurden [MHN04].

Zur Herstellung der Seile dienten tierische Materialien wie Häute und Haare oder pflanzliche Materialien wie zum Beispiel Palmfasern [Ver18b].

Die Erfindung des Drahtseils war dadurch motiviert, die Nachteile von Naturfaserseilen und Eisenketten im Bergbau zu überwinden. Hanfseile waren teure Betriebsmittel, die zudem nur in trockenen Schächten zum Einsatz kommen konnten. Bei Ketten bestand der Nachteil, dass das Versagen eines Kettenringes direkt zum Versagen der kompletten Kette führt. Das Drahtseil vereint die Beständigkeit gegen Umwelteinflüsse mit der parallelen Anordnung der tragenden Bestandteile der Drähte. Ein weiterer Vorteil des Drahtseils war die sechsfache Tragkraft im Vergleich zum Hanfseil gleichen Durchmessers. Ge-

genüber der Kette ergibt sich noch die vierfache Tragkraft, allerdings bei einem Achtel des Gewichts. Zudem kann mit dem Drahtseil gegenüber der Kette noch zwei Drittel des Raumes auf der Trommel gespart werden [Ver18b].

Oberbergrat ALBERT kam ausgehend von der Untersuchung der Ermüdung von Ketten darauf, dass Drähte ebenso wie die Fasern in Hanfseilen parallel anzuordnen sind. Neben den technischen Vorteilen, die das Drahtseil bietet, ist zudem der erhebliche ökonomische Vorteil im Vergleich zu Ketten im Blickpunkt des Erfinders [Alb35].

Der Verdienst von Oberbergrat ALBERT liegt im Anschluss an die Erfindung vor allem auch in der präzisen Beschreibung der Konstruktion und der Herstellungsweise. Dabei geht er auch auf die Speicherung des Tragmittels auf einer Trommel (Seilkorb) ein. Durch den Gewichtsvorteil des Drahtseils gegenüber einer Kette wird der Einsatz von Trommeln mit größerem Durchmesser bei gleicher Antriebsleistung ermöglicht. Dadurch kann die Speicherung einlagig erfolgen [Alb35]. Eine weitere Verbesserung des Seiltriebs hinsichtlich der Lebensdauer der Tragmittel ist die Reduzierung von Biegewechsels [Alb37].

Das von Oberbergrat ALBERT erfundene Drahtseil war aus drei Litzen mit jeweils vier Drähten so geschlagen, dass alle Drähte regelmäßig überprüft werden konnten und so die Sicherheit des Seils gewährleistet war [Ver18b].

Aktuelle Entwicklungen zeigen, dass zunehmend Kunstfaserseile den weiterentwickelten Drahtseilen Konkurrenz machen. Durch ihren Einsatz können erhebliche Gewichtsparsen bei gleicher Tragkraft realisiert werden. Gleichzeitig bieten sie eine deutlich verbesserte Widerstandsfähigkeit gegen äußere Einflüsse im Vergleich zu Naturfaserseilen. Dennoch sind sie je nach Material weniger robust gegenüber Temperatur oder chemischen Einflüssen im Vergleich zu Drahtseilen. Ein wesentlicher Nachteil liegt zurzeit noch in der Schwierigkeit die Ablegereife zu bestimmen. Liegt bei Drahtseilen bereits eine große Erfahrung in der Erkennung der Ablegereife vor, so muss diese bei den Faserseilen erst noch gewonnen werden.

In der Literatur werden folgende Vorteile von Faserseilen gegenüber Drahtseilen genannt:

- Gewicht von 20 % bis 30 % von einem Drahtseil bei gleichem Durchmesser und gleicher Bruchkraft [EKM17]. Daraus lassen sich wahlweise

folgende Vorteile realisieren: größere Förderlängen, höhere Nutzlasten, niedrigere Betriebskosten, höhere Sicherheitsfaktoren [Hei13] und einfaches Handling [EKM17] und [CC19].

- In der Regel ist keine Nachschmierung notwendig [EM18].
- Ökonomische Vorteile durch kleinere Biegeradien und damit kleinere Seilscheiben, Trommeln und Antriebsleistungen [Hei13]. Weitere ökonomische Vorteile können durch das geringere Gewicht realisiert werden [EKM17].
- In geflochtener Konstruktion sind Faserseile drehungsfrei [CC19].
- Längere Lebensdauer und größere Wartungsintervalle [Hei13].

Inwieweit sich diese Vorteile auch in der Realität zeigen, muss die Anwendung der Faserseile in der Praxis zeigen. Nachteile werden von ERNST ET AL. angegeben. Ein ganz wesentlicher ist die Notwendigkeit, das Faserseil und den Seiltrieb speziell aufeinander anzupassen [EKM17].

2.2 Grundlagen von Draht- und Faserseilen

Laufende Seile werden im Gegensatz zu stehenden Seilen in Seiltrieben bewegt. Dieser Lauf wird durch die Biegefähigkeit des Seils ermöglicht. Das Seil wird dazu um Seilscheiben und um die Seiltrommel gebogen.

Die Biegsamkeit wird durch die helixförmige Lage der einzelnen Elemente im Seil wie Drähten, Fasern und/oder Litzen ermöglicht. Die helixförmige Lage, die durch Flechten oder Schlagen erreicht wird, ermöglicht einen Spannungsabbau. Bei ausreichend großer Biegelänge liegt ein Element sowohl auf der Außenseite als auch auf der Innenseite der Biegung. Durch eine relative Verschiebung der Elemente zueinander geschieht so der Ausgleich (Abb. 2.1). Dies wäre bei einer parallelen Anordnung der Elemente nicht möglich, weil ein Element entweder immer außen oder immer innen liegt. Nachteil dieses Seilaufbaus sind die höheren Längskräfte innerhalb der Elemente und der Verschleiß durch ihre Relativbewegung. Zudem entsteht durch die Lage der Elemente eine Kraftkomponente in tangentialer Richtung des Seils, die zur Erreichung eines drehungsfreien Seils ausgeglichen werden muss [Ver18f].

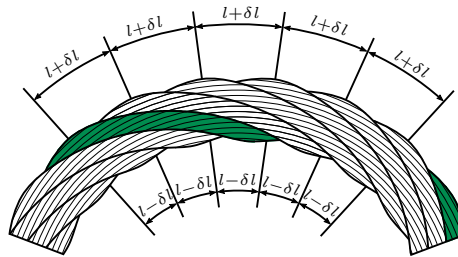
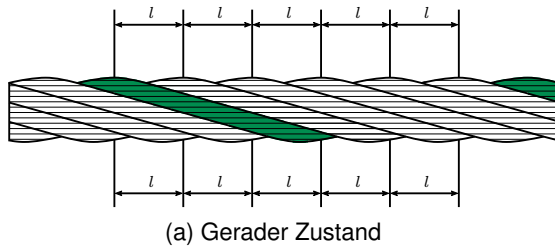


Abb. 2.1: Geschlagenes Seil mit Darstellung der Ursache des Spannungsabbaus nach [Ver18f]

Die einzelnen Elemente, aus denen Seile bestehen, können aus verschiedenen Materialien hergestellt werden. Abb. 2.2 zeigt die Reißlänge von Seilen aus verschiedenen Materialien. Diese gibt an, ab welcher Länge ein Seil unter seinem eigenen Gewicht reißen würde. Es ist erkennbar, dass Seile aus den verschiedenen Faserwerkstoffen das Drahtseil zum Teil sehr deutlich übertreffen.

In Abb. 2.3 ist zu erkennen, dass Drahtseile und Faserseile aus High-Performance Polyethylen (HPPE) bei vergleichbarer Bruchkraft ungefähr denselben Seildurchmesser haben. Aus diesem Grund werden diese Faserseile für den Ersatz von Drahtseilen ggf. in einem ansonsten unveränderten Seiltrieb in Betracht gezogen, da so der Gewichtsvorteil genutzt werden kann.

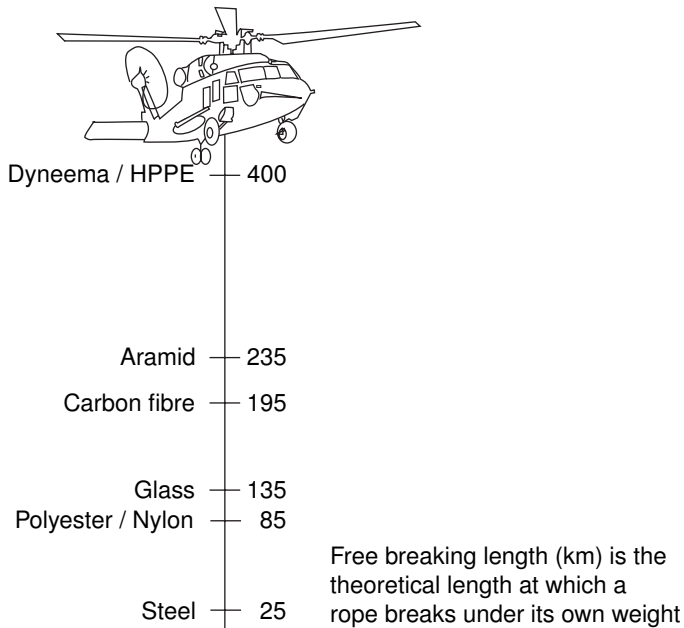


Abb. 2.2: Reißlänge von Seilen verschiedener Materialien (bearbeitet) [Din01]

2.2.1 Drahtseile

Drahtseile werden aus gezogenen Drähten gefertigt. Dazu werden die einzelnen Drähte zuerst zu Litzen und diese dann weiter zum Seil geschlagen. Ein einfacher Aufbau eines Seils ist in Abb. 2.4 dargestellt.

Durch die Variation der Schlagrichtungen von Litzen und Seil können Seile in Gleich- und Kreuzschlag hergestellt werden (Abb. 2.5). In allen Fällen entsteht jedoch durch die geschlagene Konstruktion eine tangentiale Kraftkomponente, die das Seil unter seinem Eigengewicht und stärker noch unter der Nutzlast aufdrehen lässt. Durch die geschickte Kombination von Litzen mit rechts- und linksgängigen Helices ist es möglich, drehungsarme und auch drehungsfreie Seile herzustellen [Ver18f].

Neben anderen Fertigungsparametern ist die Schlaglänge zu nennen. Diese ist neben ihrem Einfluss auf die bereits genannten Faktoren Biegefähigkeit und Tangentialkraft auch für die spätere Untersuchung zu beachten. Aufgrund der

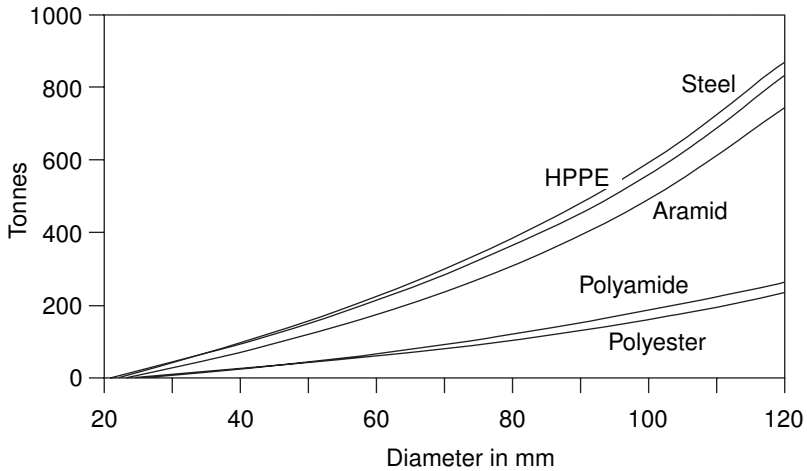


Abb. 2.3: Bruchkraft und Durchmesser verschiedener geschlagener Seile (bearbeitet) [Din01]

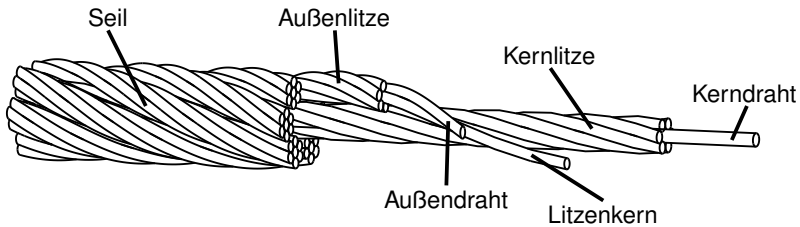


Abb. 2.4: Aufbau eines Drahtseils

zyklischen Wiederholung der Struktur bei jeder Schlaglänge muss diese Länge ins Verhältnis zur untersuchten Länge gesetzt werden, um repräsentative Aussagen sicherzustellen.

Ein Vorteil von Drahtseilen gegenüber Faserseilen ist die lange Erfahrung, die man mit der Erkennung der Ablegereife hat. Diese ist der Zeitpunkt, ab dem das Seil aufgrund von Draht- und/oder Litzenbrüchen keine ausreichende Sicherheit mehr bietet. Bewertet wird die Ablegereife anhand von in Versuchen und in der Praxis gesammelter Erfahrung, mit wie vielen Drahtbrüchen auf bestimmten Längen das Seil noch tragfähig ist. Diese Werte sind in Abhängigkeit der Konstruktion in Normen festgelegt.

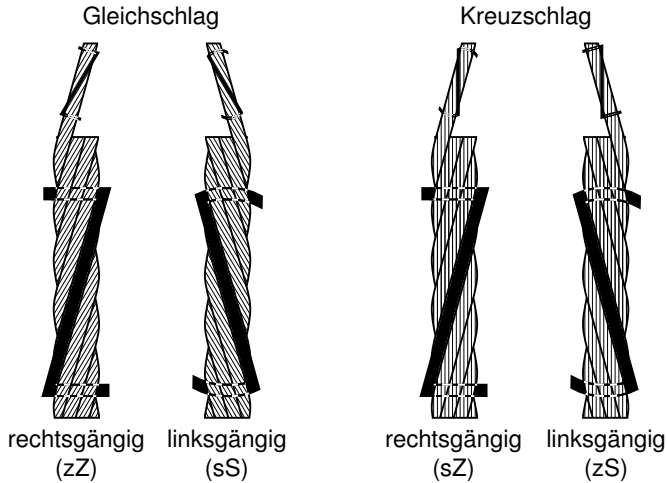


Abb. 2.5: Schlagrichtung von Drahtseilen

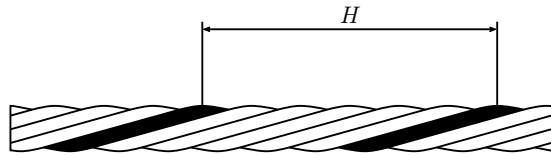


Abb. 2.6: Schlaglänge eines geschlagenen Seils mit 6 Außenlitzen

2.2.2 Faserseile

Ausgangsmaterial für Hochleistungsfaserseile sind Fasern, die hochmodulare (High-Modulus) und hochfeste (High-Tenacity) (HM-HT) Eigenschaften aufweisen [Hea01]. Diese Eigenschaften sind bei folgenden Materialien zu finden, die daher zur Seilherstellung verwendet werden: Polyester, hochmodulare polymer Fasern, Karbon, Glas und Keramik [Hea01].

Die in dieser Arbeit untersuchten Faserseile bestehen alle aus einem Hochleistungs-Polyethylen (High-Performance Polyethylen (HPPE) oder High-Modulus Polyethylen (HMPE) ¹). Der Grund für die hohe Zugfestigkeit der Hochleistungsfaser liegt in der hohen Orientierung der langkettigen Moleküle und

¹Definition für HMPE nach [DINENISO1968]: „Parallele, molekular ausgerichtete gel-gesponnene Polyethylenfaser mit hohem Modul und hoher Zähigkeit“

dem hohen Kristallisationsgrad [Din01]. Vorteile dieser Fasern sind das gute Verhältnis von Gewicht zu seinen mechanischen Eigenschaften, eine gute Flexibilität und ein hoher Abrasionswiderstand. Von Nachteil kann demgegenüber der niedrige Schmelzpunkt sein [Din01].

Nach der Produktion liegt eine Faser zuerst als Filament vor. Die Länge der Textilfaser kann als unendlich angesehen werden. Aus den Filamenten wird ein Garn gedreht [DINENISO1968]. Aus mehreren Garnen kann wiederum eine Litze gedreht werden. Ein Seil wird durch Schlagen, Flechten oder durch paralleles Anordnen von Litzen hergestellt. Als Vorteil von geflochtenen Konstruktionen nennt MICHAEL die Eigenschaften Drehungsfreiheit, hohen Abrasionswiderstand und gute Spleißbarkeit [Mic11].

Rundgeflechte werden durch eine gleiche Anzahl von links- und rechtsgängigen Litzen hergestellt. Die Litzen werden dazu wendelförmig gekreuzt [DINENISO1968]. Sie haben weitere prinzipielle Vorteile: Sie weisen eine runde Gestalt auf, besitzen eine hohe Festigkeit und eine geringe Dehnung und sind endlos herstellbar. Eine negative Eigenschaft ist jedoch ihre Abflachung unter Last [Mic11].

Eine Variante eines geflochtenen Seils ist die Herstellung mit Mantel. Dabei trägt der Kern die volle Last und der Mantel dient zum Schutz der lasttragenden Elemente [Mic11].

Nach der eigentlichen Herstellung können Seile noch veredelt werden. Dazu kann das Aufbringen von Wärme auf das Seil dienen (in [DINENISO1968] als Thermofixieren bezeichnet). Beim Verstrecken wird die molekulare Ausrichtung in Filamenten erhöht [DINENISO1968]. Dadurch wird die Zugfestigkeit erhöht. HEINZE und MAMMITZSCH beschreiben das Thermofixieren als eine kombinierte thermo-mechanische Behandlung mit der gleichzeitigen Anwendung der beiden zuvor genannten Behandlungen [HM11].

Analog zur Schlaglänge geschlagener Seile gibt es bei geflochtenen Seilen die Flechtlänge (Abb. 2.7). Diese hat ähnliche Einflüsse auf die mechanischen Eigenschaften des Seils und ist ebenso bei der späteren Untersuchung eines Seils zu berücksichtigen.

Zur Lebensdauer und zur Erkennung der Ablegereife gibt es Forschungsarbeiten bspw. von VOGEL [Vog98], HEINZE [Hei13] und NOVAK [Nov17]. Auch in der

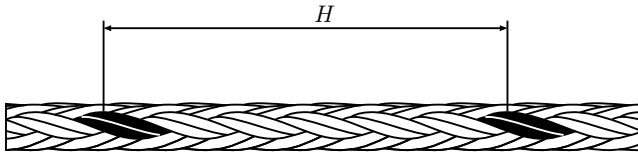


Abb. 2.7: Flechtlänge eines 12-fach geflochtenen Seils

Normung gibt es Angaben zu Ablege Kriterien. In der Richtlinie [VDI 2500] sind verschiedene Kriterien definiert wie: Bruch einer Litze oder mehr als 10 % der Garne im Seil, mehr als 10 % Querschnittsverlust durch Abrieb, Verrottung oder Lockerung von Spleißen. SCHMIEDER ET AL. merken dazu jedoch an, dass diese Kriterien zwar existieren, aber nur schwer in der Praxis angewendet werden können [SHM14].

Um dieses Problem zu beheben, gibt es verschiedene Ansätze, die Ablegereife anhand von anderen Merkmalen am Seil festzustellen. Ein Beispiel dafür ist die Einarbeitung spezieller Fasern in das Seil, um von deren Zustand auf den des Seils zu schließen [HGG15]. Eine andere Vorgehensweise beschreiben ERNST ET AL. mit der Überwachung des Seilmantels. Hier wird auf den Zustand des Seils aufgrund des Zustands des Mantels geschlossen [EKM17].

Neben der Sicherheit, die dadurch gewährleistet wird, schreiben zudem auch Richtlinien vor, dass die Ablegereife von Faserseilen in der Mehrlagenwicklung durch Experimente nachzuweisen ist [FEM5.024].

Um das Wissen zur Lebensdauer bei Faserseilen zu erweitern, gibt es neben der Forschung im Labor auch verschiedene Bereiche der Technik, in denen Faserseile im Feld eingesetzt werden.

Offshore bieten Faserseile den Vorteil, dass sie ein geringes Gewicht aufweisen und manche im Wasser schwimmen und dadurch kein Eigengewicht unter Wasser zu berücksichtigen ist. Dadurch sind sie für Fischfang, seismische Erkundungen und Produktionsanwendungen besonders interessant [Erl19].

Der Gewichtsvorteil ist aber auch an Land relevant. Verschiedene Kranhersteller setzen auch Faserseile auf Kranen ein. Dabei kommen sowohl Seile mit als auch ohne Mantel zum Einsatz (Abb. 2.8 und Abb. 2.9).

Aufgrund der großen Seillängen und der damit verbundenen großen Relevanz



Abb. 2.8: Faserseil mit Mantel mehrlagig gewickelt [EM18]

des Eigengewichts sind Faserseile auch besonders im Bergbau interessant. HUNTLEY und COTE beschreiben den Einsatz eines Faserseils in einem elfmörtigen Test in einem Produktionsschacht (Abb. 2.10) [HC17].

2.2.3 Seildurchmesser

Die einfachste Unterscheidung von Seilen kann neben dem Material anhand des Seildurchmessers d vorgenommen werden. Da es sich nicht um einen ideal runden Querschnitt handelt, ist es wichtig, den Durchmesser an der richtigen Stelle zu messen. Bei einem idealen punktsymmetrischen Aufbau mit einer geraden Anzahl an Außendrähten oder -litzen ist der Durchmesser über die Kuppen gegenüberliegend zu messen (Abb. 2.11a). Bei einer ungeraden Anzahl muss das Messwerkzeug so aufgebaut sein, dass über die nicht gegenüberliegenden Kuppen gemessen wird. Diese Vorgabe gilt sowohl für Draht- als auch Faserseile. Falsch ist es, über die Täler zu messen (Abb. 2.11b) [Ver18a] und [MHN04].



Abb. 2.9: Faserseil ohne Mantel mehrlagig gewickelt [Hat15]



Abb. 2.10: Faserseil auf einer Seiltrommel für den Einsatz im Bergbau [HC17]

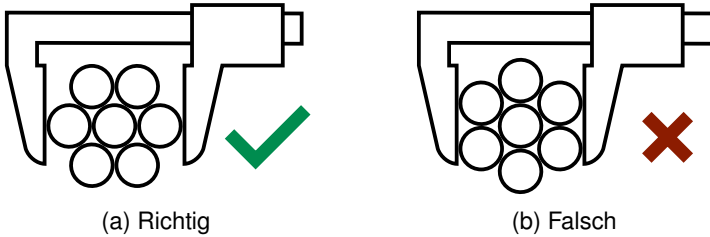


Abb. 2.11: Messen des Seildurchmessers

MCKENNA ET AL. empfehlen zudem, die Messung an mehreren Stellen vorzunehmen und das Ergebnis zu mitteln, da es sich bei den Bestandteilen des Seilquerschnitts nicht um ideale geometrische Elemente handelt [MHN04].

Um Abweichungen in der Fertigung und Veränderungen im späteren Betrieb zuzulassen, sind in der Norm [DINEN12385-4] Toleranzen für Drahtseile vorgegeben. Der gemessene Durchmesser darf demnach für Seile mit einem Nenn-durchmesser d_n ab 8 mm bei einer Abweichung von + 5 % vom Nenndurchmesser liegen. Für Faserseile konnten derartige Angaben nicht gefunden werden.

In verschiedenen Werken wird der tatsächliche Durchmesser von Faserseilen durch einen den Seilquerschnitt umschreibenden Kreis definiert [VDI 2500] und [FEM5.024]. Zur Ermittlung können zudem eine Zugkraft und ein bestimmtes Verfahren vorgegeben werden [DINENISO1968].

Der so beschriebene Durchmesser darf nach der Norm [DINENISO9554] neben anderen Seileigenschaften zwischen Hersteller und Käufer festgelegt werden. Die Seilauswahl und damit der Seildurchmesser liegt laut der Richtlinie [FEM5.024] in der Verantwortung des Kranherstellers, wobei der Seilhersteller unterstützend tätig werden kann. Der Seildurchmesser ist zu Beginn und während des Einsatzes zu beobachten.

Aufgrund der belastungsabhängigen Veränderung des Seilquerschnitts messen FEYER und VOGEL den Seildurchmesser in Richtung der Querkraft und orthogonal dazu. Der angegebene Durchmesser wird aus dem Mittelwert der beiden Ergebnisse berechnet. Im Verlauf von Biegewechseluntersuchungen wird eine Reduzierung des Seildurchmessers des hochfesten PE-Faserseils auf ungefähr 90 % des Ausgangsdurchmessers beobachtet. Diese Abnahme

kann neben anderen Kriterien auch zur Erkennung der Ablegereife dienen [FV91].

Die Reduzierung des Durchmessers unter reiner Zugkraft wird bei dem gleichen Seil auf knapp 90 % des Ausgangsdurchmessers angegeben [FV91].

Für andere Seilwerkstoffe nennen MCKENNA ET AL. auch eine deutlich stärkere Reduzierung des Durchmessers. Für Manila und Nylon Seile verschiedener Durchmesser werden bei 20 % der Mindestbruchkraft (MBF) Werte von zwischen knapp 10 % bis 20 % genannt. Bis zum Seilbruch steigen sie teilweise bis auf über 30 % [MHN04].

Auch HEINZE spricht von einer erheblichen Abnahme des Seildurchmessers beim Setzen des Seils zu Nutzungsbeginn [Hei13].

Für Drahtseile werden von FEYRER und WEHNING Reduzierungen des Seildurchmessers auf im Mittel 97 % des Ausgangsdurchmessers angegeben [FW18].

Da es auch bei Drahtseilen zu einer Deformation des Seilquerschnitts beim Lauf über Seilscheiben und auf die Trommel wie von BECHTLOFF beschrieben kommt [Bec69], gibt es Vorgaben, wie diese Seileigenschaft untersucht werden kann [ISO16839]. Die Messung der Deformation von Drahtseilen in der Mehrlagenwicklung wird unter der tatsächlich vorliegenden Querdruckbelastung durchgeführt. Allerdings wird keine Zugkraft aufgebracht. Daher ist der Versuch nicht realitätsnah [SW14] und [Sch14].

Die Auswirkung der Deformation von Drahtseilen auf ihre Lebensdauer wird von BERNER untersucht und ein reduzierender Einfluss wechselnder Ovalisierung auf die Seillebensdauer festgestellt [Ber11].

MICHAEL beschreibt, dass sich vor allem Hohlgeflechte unter Belastung abflachen. Der Seilquerschnitt wird meist als elliptisch beschrieben. Zudem wird eine Reduktion des Seildurchmessers unter Zugkraft festgestellt. Die Messung des Seildurchmessers erfolgte dazu mit einem Messschieber. Gemessen wurde in fünf verschiedenen Winkelpositionen um das Seil und an drei verschiedenen Stellen in Längsrichtung, um durch eine Mittelwertbildung Abweichungen auszugleichen. Zudem wurde mithilfe von Laser-Profil-Scanner (LPS) die Fläche des Seilquerschnitts ermittelt und daraus ein Seildurchmesser bestimmt [Mic11].

Neben der Deformation hin zu einer Ellipse gibt es in der Mehrlagenwicklung eine Deformation zu einem sechseckigen Seilquerschnitt. CRAIG und CANNEL zeigen einen mithilfe von LPS aufgenommenen Seilquerschnitt aus der Mehrlagenwicklung, der eine sechseckige Gestalt zeigt. Charakterisiert wird dieser Querschnitt über den größten Durchmesser über die Spitzen des Sechsecks und über dessen kleinsten Durchmesser über zwei parallele Seiten [CC19].

ERLENDSSON zeigt in [Erl19] grafisch und ERNST ET AL. beschreiben in [EKM17] die Eigenschaft von Faserseilen, durch die Deformation zu sechseckigen Querschnitten eine mehrlagige Seiltrommel im Gegensatz zu Drahtseilen vollständig ausfüllen zu können. Dieses Verhalten lässt sich in Abb. 2.12 anhand der deformierten ersten Lage erkennen (bei manchen Umwicklungen auch in Abb. 2.15).

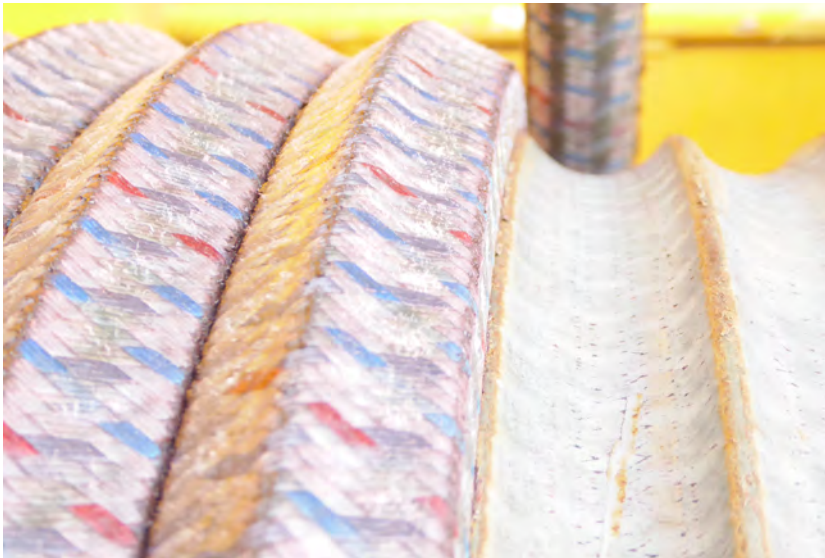


Abb. 2.12: Faserseil deformiert zu sechseckigem Querschnitt im Parallelbereich der 1. Lage nach mehrlagiger Bewicklung [EM18]

Im Standard [DNV-RP-H201] ist angegeben, dass Faserseile meist einen größeren Durchmesser im Vergleich zu Drahtseilen der gleichen Tragkraft haben. Der Seilquerschnitt ist im Einsatz zu beobachten, da es zu Veränderungen kommen kann. Diese Veränderungen können auf die Belastung durch eine Last oder auf den Kontakt mit Oberflächen von Seilscheiben oder der Trommel

zurückzuführen sein. Bei der Nutzung von Wickelhilfen ist eine Querschnittsveränderung zwischen verschiedenen Lastzuständen am Seil zu beachten, jeweils wenn diese auftreten. Zudem besteht eine erhöhte Gefahr des Einschneidens [DNV-RP-H201].

Hochleistungsfaserseile werden im Vergleich zu Drahtseilen stärker zusammengedrückt und flachen daher stärker ab. Dies führt üblicherweise im aufgewickelten Zustand zu einem nicht runden Seilquerschnitt. Vor der Optimierung der Rillung soll die entstehende Breite des Seils unter Druck berücksichtigt werden. Ebenfalls ist zu beachten, dass sich der Seildurchmesser unter Zugkraft verändert. Das Seil ist vor dem Einsatz mit der entsprechenden Zugkraft zu belasten. Dies gilt auch für eine durchzuführende Messung [FEM5.024].

Nach der Norm [DINENISO9554] soll der Durchmesser der Rillung von Seilscheiben 10 % bis 15 % über dem Nenndurchmesser liegen. Dabei wird jedoch keine Abhängigkeit von der Deformation angegeben.

NOVAK empfiehlt hingegen mit $\frac{r}{d} = 0,51$ einen Durchmesser der Rillung der 2 % über dem Nenndurchmesser liegt. Dies geschieht mit dem Ziel, eine höhere Lebensdauer des Seils zu erreichen [Nov17].

Den entgegengesetzten Weg mit dem Ziel einer guten Wickelqualität (entsprechend [FEM5.024]) wird in den Patenten [Lie] und [LSW] und von LOHRENGEL ET AL. eingeschlagen [LSSW15]. Die Rillengeometrie soll an den deformierten Seilquerschnitt angepasst werden.

Für die Mehrlagenwicklung beschreiben LEE ET AL. die Optimierung eines Seils. Resultierend aus dem Druck der Mehrlagenwicklung zeigt das in Abb. 2.13 dargestellte Seil eine starke Deformation und ein ungleichmäßiges Wickelbild [LHC11].

Durch einen anderen Aufbau des Seilquerschnitts (Abb. 2.14) konnte das Wickelergebnis deutlich verbessert werden Abb. 2.15 [LHC11].

Zur Quantifizierung der Deformation gibt es verschiedene Ansätze. LEE ET AL. berechnen die Exzentrizität aus größtem Seildurchmesser (a) und kleinstem Seildurchmesser (b) [LHC11].



Abb. 2.13: Deformiertes Faserseil in der Mehrlagenwicklung [LHC11]

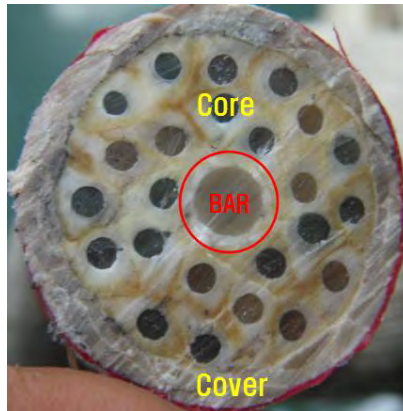


Abb. 2.14: Querschnitt des für die Mehrlagenwicklung optimierten Faserseils [LHC11]

$$\text{Exzentrizität} = \sqrt{1 - \left(\frac{a}{b}\right)^2}. \quad (2.1)$$



Abb. 2.15: Mehrlagenwicklung des optimierten Faserseils [LHC11]

Das Ergebnis für einen Kreis wäre ein Wert von 0. In Abb. 2.16 ist zu erkennen wie die Deformation mit zunehmender Lagenzahl zur 6. Lage hin abnimmt.

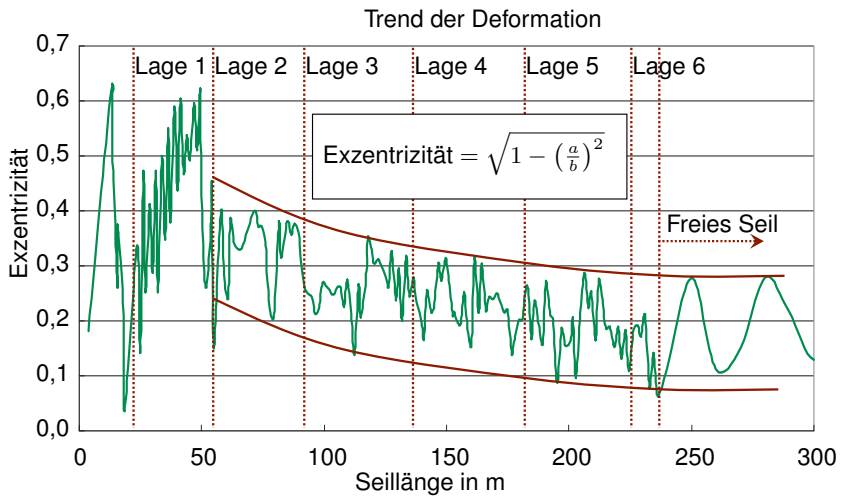


Abb. 2.16: Trend der Deformation eines Faserseils nach [LHC11]

LOHRENGEL ET AL. definieren zur Quantifizierung der Deformation des Seilquerschnitts die relative Ovalisierung

$$O_{\text{rel}} = \frac{d_{\text{max}} - d_{\text{min}}}{d_{\text{max}}}. \quad (2.2)$$

Dieser Wert wird am von der Seiltrommel abgelaufenen Seil gemessen. Es handelt sich somit um die bleibende Verformung des Querschnitts. Auch bei dieser Kenngröße entspricht ein Wert von 0 einem runden Querschnitt [LSW13].

2.3 Grundlagen von Seiltrommeln

Richtungsangaben werden immer in Bezug auf die Seiltrommel angegeben (Abb. 2.17). x gibt dabei die axiale, y die radiale und φ die tangentielle Trommelrichtung an. Wenn das Seil von der Trommel abgelaufen und im gestreckten Zustand ist, werden die Richtungen durch ein kartesisches System beschrieben, bei dem die tangentielle Richtung durch z ersetzt wird.

Für einlagig bewickelte Seiltrommeln kann eine helixförmige Rillung verwendet werden (Abb. 2.18a, 1. Lage). Problematisch wird diese Rillung ab der zweiten Lage. Das Seil wird in der zweiten Lage nach einer Kreuzung mit der ersten Lage wieder in Richtung der falschen Bordscheibe geführt. Dieses Problem wird durch die Nutzung einer System-Rillung (nach dem Erfinder auch Lebus-Rillung genannt) vermieden. Das Seil wird immer gleichzeitig im Kreuzungsbereich (KB) um jeweils einen halben Rillenabstand weitergeführt, wodurch das Seil sich durch die gegenläufigen Richtungen in Summe um eine Rillenbreite in den nächsten PB bewegt. Insgesamt wird dadurch die axiale Bewegung des Seils reduziert, da es nicht wie auf einer Trommel mit helicoidaler Rillung zwischendurch in Richtung der falschen Bordscheibe geführt wird (Abb. 2.18b) [Ver18e].

Für das Seil bzw. das sich ergebende Seilpaket stellen sich in den Parallel- und Kreuzungsbereichen unterschiedliche Auflageverhältnisse ein. Im Parallelbereich liegt das Seil ab der zweiten Lage mit zwei Linienberührungen auf

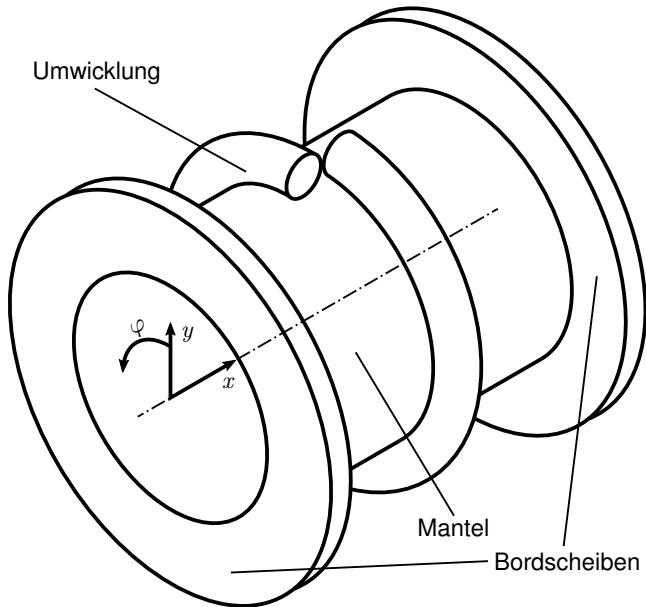


Abb. 2.17: Trommel mit einer Umwicklung und Koordinatendefinition: x : axial, y : radial und φ : tangential

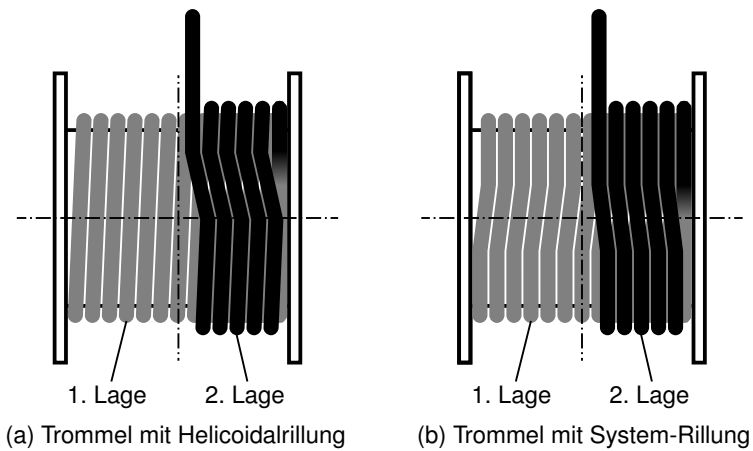


Abb. 2.18: Zwei Lagen Seil auf einer Trommel nach [Ver18e]

zwei darunterliegenden Umwicklungen. Im Kreuzungsbereich gibt es dagegen lediglich einen linienförmigen Kontakt der über eine darunterliegende Umwicklung umläuft.

2.3.1 Seiltrommel in System Seiltrieb – Begriffsdefinition

Um eine eindeutige Verwendung der Begriffe zu Seil und Trommel sicherzustellen sollen diese definiert werden.

- Mantel: zylindrischer Teil der Trommel um den das Seil gewickelt wird (Abb. 2.17).
- Trommeldurchmesser D : Durchmesser des Mantels gemessen im Rillengrund (Abb. 2.19)². Der erforderliche Durchmesser D wird im Verhältnis zum Seildurchmesser d angegeben: dem D/d -Verhältnis.

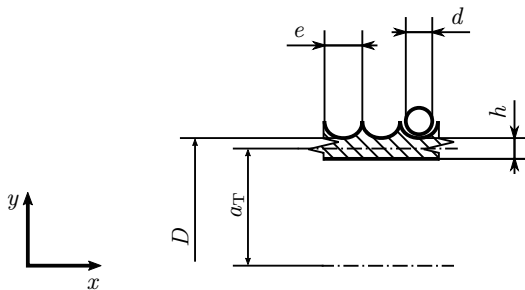


Abb. 2.19: Trommeldurchmesser D und Rillenabstand e

- Bordscheiben: Zylinderscheiben halten das Seil auf der Trommel und ermöglichen dadurch insbesondere die Mehrlagenwicklung (Abb. 2.17).
- Rillung: Geometrie auf dem Mantel, um das Seil in der ersten Lage entsprechend einer vorgegebenen Bahn zu führen. Der Querschnitt und der Rillenabstand e (Abb. 2.19) werden dabei entsprechend dem Seildurchmesser gewählt [DIN15020-1], [DIN15061-2], [DINEN14492-1a], [DINEN14492-2], [DINEN13135], [AS1418.1] und [DNVNo.2.22]. Im

²Eine andere ebenfalls gängige aber hier nicht angewandte Möglichkeit ist der Bezug des Trommeldurchmessers D auf die Mitte der ersten Lage.

Bergbau ist eine Trommel ohne Rillung zulässig wenn verschiedene Seildurchmesser aufgelegt werden sollen [TAS].

- System-Rillung (Lebus-Rillung): Das Seil wird nicht entlang einer Helix um den Mantel geführt. Vielmehr wird es in Parallel- und Kreuzungsbereichen geführt (Abb. 2.18 und Abb. 2.20).
- Umwicklung: Seilstück dass während einer betrachteten Umdrehung auf die Trommel aufläuft (Abb. 2.17).
- Lage: Alle Umwicklungen ($j = 1, \dots, n, \dots, u$) nebeneinander gehören zu einer Lage, die gleich viele Umwicklungen unter sich haben (Abb. 2.18 und Abb. 2.20). Lagen werden von $i = 1, \dots, k, \dots, l$ angegeben.
- Parallelbereich (PB): Das Seil wird parallel zur Bordscheibe geführt. Dadurch ergibt sich zwischen zwei aufeinanderfolgenden Lagen ein axialer Versatz von einer halben Rillenbreite e zwischen den Umwicklungen. Die obere Umwicklung liegt im Tal zwischen zwei Umwicklungen eine Lage darunter. Der Aufbau des Wickelpaketes zeichnet sich im PB durch eine pyramidenförmige Anordnung aus (Abb. 2.20 Schnitt PB 1). Während der Trommeldrehung (Bewegung in φ -Richtung) gibt es keine Seilbewegung in x - und y -Richtung (Abb. 2.18 und Abb. 2.20).
- Kreuzungsbereich (KB): Das Seil wird je nach gerader oder ungerader Lage mit einer Steigung hin zu der einen oder der anderen Bordscheibe geführt. Durch die unterschiedliche axiale Bewegung kreuzen sich die Umwicklungen unterschiedlicher Lagen dabei. Die Umwicklung läuft im Kontakt zur darunterliegenden über. Dabei kommt es in der Mitte des PB zu einer stapelförmigen Anordnung des Seilpakets (Abb. 2.20 $\frac{1}{2}$ KB 1). Während der Trommeldrehung (Bewegung in φ -Richtung) gibt es eine Seilbewegung in x - und y -Richtung. (Abb. 2.18 und Abb. 2.20).
- Aufstiegsbereich: wenn das Seil im letzten Parallelbereich direkt an der Bordscheibe anliegt (Abb. 2.20 Mitte PB 1), kann es im folgenden Kreuzungsbereich (KB 1) nicht mehr in axialer Richtung weiter. Daher steigt das Seil an dieser Stelle in die folgende Lage auf (Aufstieg dritte Lage zu vierter Lage). Dabei gibt es keine Seilbewegung in x -Richtung aber eine Seilbewegung in y -Richtung. Im folgenden PB (Abb. 2.20 PB 2) läuft das Seil weiter entlang der Bordscheibe. Ab dem anschließenden

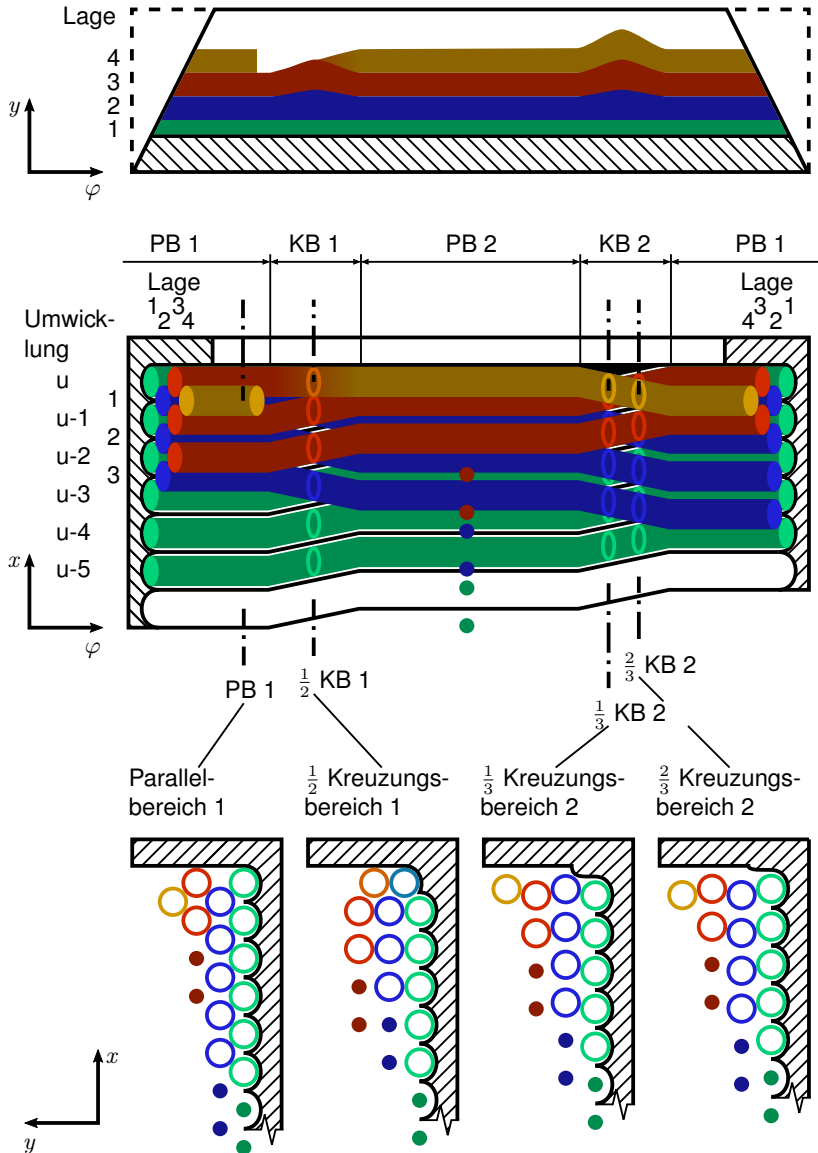


Abb. 2.20: Abwicklung einer System-Rillung mit dem Aufstieg des Seils an der Bordscheibe von den ungeraden in die geraden Lagen und Schnittbilder der Seilanordnungen durch Parallel- (PB) und Kreuzungsbereich (KB)

KB (Abb. 2.20 KB 2) folgt das Seil wieder dem Verlauf innerhalb der aktuellen Lage.

- Wickelpaket: Seilstück das zum betrachteten Zeitpunkt auf die Seiltrommel aufgewickelt ist. Bei vollständiger Bewicklung der Trommel besteht es aus sämtlichen Umwicklungen aller Lagen.
- Wickellücke: Fehler im Wickelpaket durch zu großen Abstand zwischen zwei Umwicklungen (Abstand deutlich größer als Rillenabstand e) (vgl. Abb. 2.27).
- Auflaufkeil: Zur Stabilisierung des Wickelpaketes in den höheren Lagen erfüllt der Auflaufkeil zwei Aufgaben. Erstens führt er das Seil im Aufstiegsbereich von der ersten zur zweiten Lage und schont damit das Seil. Zweitens füllt er den ansonsten freien Raum einer halben Rillenbreite neben der letzten Umwicklung. Weil diese nicht mehr in die Lücke rutschen kann, ergibt sich ein stabiler pyramidenförmiger Aufbau (Abb. 2.21).

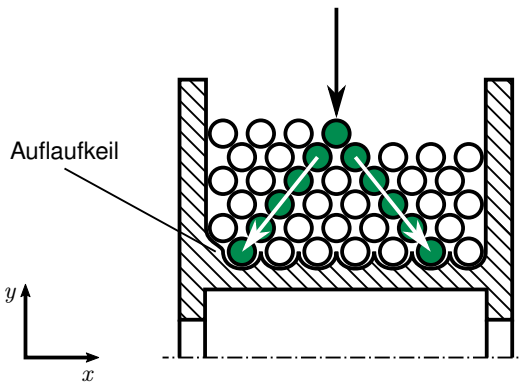


Abb. 2.21: Mehrlagige Trommel mit Rillung und Auflaufkeil: stabiles Wickelpaket wird erreicht da ein Kollabieren der Pyramide durch axiales verrutschen der Umwicklungen verhindert wird nach [Ver18e]

- Ablenkwinkel δ : Der maximale Ablenkwinkel

$$\delta_{\max} = \arctan \left(\frac{L - d}{2 \cdot A} \right) \quad (2.3)$$

beeinflusst entscheidend die Wicklung auf der Trommel (Abb. 2.22). Um eine mehrlagige Wicklung zu erreichen, darf er nicht zu klein sein. Der kleinste Winkel von $0,5^\circ$ ([Zol]) stellt sicher, dass das Seil, wenn es an einer Bordscheibe in die nächste Lage aufgestiegen ist, durch den Schrägzug wieder von der Bordscheibe wegläuft. Andernfalls würde sich das Seil in einer Spirale mit einer Umwicklung je Lage aufwickeln [Wei08]. Die Begrenzung des maximalen Ablenkwinkels auf $1,5^\circ$ ([Zol] und [TAS]) stellt eine gute Wickelqualität sicher. Bei zu großem seitlichem Zug würde das Seil gar nicht bis zur Bordscheibe laufen und somit die Trommellänge nicht komplett ausnutzen. Zudem ermöglicht er eine bessere Lebensdauer des Seils. Ein zu großer Winkel führt zu Berührungen zwischen den Umwicklungen, wodurch es zu erhöhtem Verschleiß kommt [Ver18d].

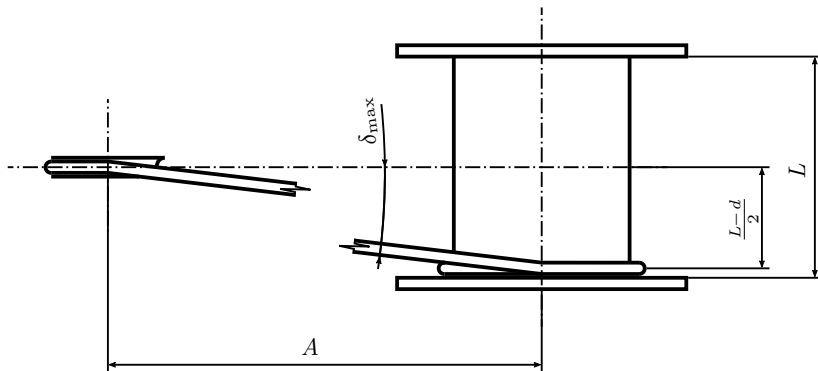


Abb. 2.22: Ablenkwinkel des Seils zwischen Trommel und erster Seilscheibe

Die Findung optimaler Trommelparameter kann in Anlehnung an MUPENDE in folgenden Schritten ablaufen [Mup01]. Zuerst ist der Seildurchmesser entsprechend der Anwendung unter Beachtung von Normen festzulegen. Ebenfalls nach der Anwendung ergibt sich die erforderliche Seillänge. Aus der Norm ergibt sich auch der zulässige Trommeldurchmesser. Mit der notwendigen Seillänge kann anschließende die Trommellänge im Zusammenspiel mit der sich ergebenden Lagenzahl festgelegt werden. Abschließend ist noch der Werkstoff

für die Trommel festzulegen.

Wie in den zuvor definierten Begriffen zu erkennen ist, ergibt sich die Notwendigkeit, nicht nur das Seil und die Trommel sondern das ganze System des Seiltriebs bei der Auslegung aufgrund von Wechselwirkungen im Blick zu haben.

2.3.2 Trommelberechnung

Die Belastungen für die Seiltrommel ergeben sich durch das Zusammenspiel aus mehrlagig gewickeltem Seil und der Trommel. Die wesentlichen Teilbelastungen sind dabei der Manteldruck, der aus der Umwicklung der Trommel durch das Seil resultiert und die Axialkräfte auf die Bordscheiben, die durch das Aufsteigen und das Halten des Seils auf der Trommel verursacht werden. Aufgrund ihrer geringeren Bedeutung für die Gesamtbelastung werden entstehende Biege- und Torsionsmomente in der Berechnung vernachlässigt.

Die Höhe der Belastungen wird durch die Eigenschaften der Teilsysteme Seil und Trommel bestimmt. Wesentlichen Einfluss haben die Seilelastizitätsmoduln in Längs- und Querrichtung. Bei der Trommel hat ebenfalls das Elastizitätsverhalten einen wesentlichen Einfluss.

Ausgehend von der Arbeit von DIETZ gab es am IMW Arbeiten von HENSCHEL, MUPENDE, OTTO und SCHWARZER zur Untersuchung des Systems aus Seil und Trommel [Die71], [Hen99], [Mup01], [Ott04] und [Sch11]. Die folgenden Berechnungen sind aus diesen Arbeiten entnommen.

Für die Berechnung der Belastungen werden der Mantel und die Bordscheiben jeweils für sich betrachtet.

Berechnung des Trommelmanteldrucks

Der Grundgedanke der Trommelberechnung von DIETZ ist die Berücksichtigung der Wechselwirkungen zwischen Seil und Trommel. Dabei kommt es zu Entlastungseffekten, wodurch nicht die Summe der Einzellasten aus jeder Umwicklung auf den Trommelmantel wirkt. Zum einen wird die Trommel unter der Belastung des Wickelpaketes zusammengedrückt. Dadurch können die bereits

aufliegenden Umwicklungen die Zugspannung entsprechend ihres Längselastizitätsmoduls E_{SL} abbauen und reduzieren damit den auf die Trommel aufbrachten Druck. Zum anderen verursachen die Umwicklungen, die übereinander gewickelt sind, einen Druck auf die darunterliegenden Umwicklungen. Diese werden infolge des Drucks entsprechend des Querelastizitätsmoduls E_{SQ} zusammengedrückt und reduzieren damit ebenfalls ihren Druck auf die Trommel. Dabei tritt jedoch auch ein entgegengesetzter Effekt auf. Durch die Reduzierung des Wickelradius wird eine Erhöhung des Drucks durch die jeweilige Umwicklung bewirkt.

Um die Umwicklungen und die Trommel der Berechnung zugänglich zu machen, vereinfacht DIETZ die Geometrie. Die Trommel wird entsprechend der Anzahl der Umwicklungen in u einzelne Schalenelemente unterteilt. Die Umwicklungen werden als übereinanderliegende konzentrische Ringe angenommen. Diese besitzen einen quadratischen Querschnitt A_{real} mit der Kantenlänge s . Der Querschnitt entspricht der tatsächlichen Fläche der tragenden Elemente. Das Zusammenwirken der Ringe untereinander und zwischen Schalenelement und dem Ring der ersten Lage ist derart, dass kein Rutschen und kein Klaffen auftritt (Abb. 2.23) [Die71].

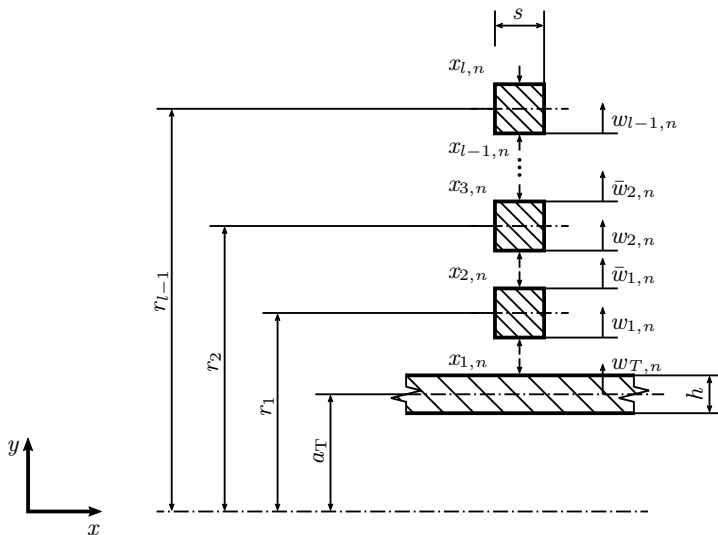


Abb. 2.23: Ersatzmodell des Wickelpaketes nach [Die71]

Zur Berechnung der Wickelradien im belasteten Wickelpaket verwendet DIETZ den Mittelwert aus dem Seildurchmesser und der Kantenlänge des Ersatzquerschnitts.

Eine wesentliche Erweiterung der Berechnung wurde durch HENSCHEL eingeführt. Er betrachtet in seiner Berechnung den Querelastizitätsmodul des Seils als nicht konstant, sondern vielmehr als einen lagenabhängigen Wert [Hen99].

Der Druck auf den Mantel an der Stelle n

$$p_{T,n} = \sum_{i=1}^l x_{i,n} \quad (2.4)$$

wird aus der Summe der Einzeldruckanteile berechnet.

Die Druckanteile $x_{i,n}$ der einzelnen Lagen ergeben sich aus der Lösung des linearen Gleichungssystems

$$S = \begin{bmatrix} \alpha_1 & \delta_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \delta_1 & \alpha_2 & \delta_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \delta_2 & \alpha_3 & \delta_3 & 0 & 0 & 0 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 0 & 0 & 0 & \delta_k & \alpha_{k+1} & \delta_{k+1} & 0 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \delta_{l-2} & \alpha_{l-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{1,n} \\ x_{2,n} \\ x_{3,n} \\ \cdot \\ x_{k,n} \\ \cdot \\ x_{l-1,n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \cdot \\ 0 \\ \cdot \\ -\delta_{l-1} \cdot x_{l,n} \end{bmatrix}, \quad (2.5)$$

mit:

$$\alpha_1 = [\delta_T - (1 + f_1) \cdot \delta_1], \quad (2.6)$$

$$\text{für } i = 2, 3, \dots, l - 1;$$

$$\alpha_i = -[(1 + f_{i-1}) \cdot \delta_{i-1} + (1 + f_i) \cdot \delta_i], \quad (2.7)$$

$$\text{für } i = 1, 2, \dots, l - 1;$$

$$\delta_i = -\frac{r_i^2}{E_{SL,i} \cdot s}, \quad (2.8)$$

$$f_i = \frac{s_i^2}{2 \cdot r_i^2} \cdot \frac{E_{SL,i}}{E_{SQ,i}}, \quad (2.9)$$

$$r_i = a + \frac{h}{2} + \left(i - \frac{1}{2}\right) \cdot s \quad \text{und} \quad (2.10)$$

$$s = \sqrt{A_{\text{real}}}, \quad (2.11)$$

mit:

δ_T	Absenkung der Seiltrommel unter dem Umwicklungsdruck $p = 1$,
δ_i	Absenkung der Umwicklung mit dem mittleren Radius r_i ,
f_i	Verminderung des Druckes der Seilwindung i ,
$E_{SL,i}$	Längselastizitätsmodul der Lage i ,
$E_{SQ,i}$	Querelastizitätsmodul der Lage i ,
s	Kantenlänge des quadratischen Ersatzquerschnitts,
a_T	mittlerer Radius des Trommelmantels,
h	Mantelwandstärke und
l	Lagenzahl.

Berechnung der Bordscheibenlasten

Das Aufsteigen der letzten Windung wird von DIETZ als wesentliche Ursache für die Bordscheibenlasten beschrieben. Dabei werden die Bordscheiben und das Wickelpaket als ideal unelastisch angenommen [Die71].

In einer ausführlicheren Beschreibung von MUPENDE wird die Belastung aufgeteilt. Während des Lagenwechsels im Aufstiegsbereich liegt eine andere Belastungssituation vor als während der Anlage des Seils an der Bordscheibe im folgenden PB (vgl. Abb. 2.20) [Mup01]. Die Kontaktsituation während des Auf-

stiegs von der ersten in die zweite Lage ist in Abb. 2.24 dargestellt.

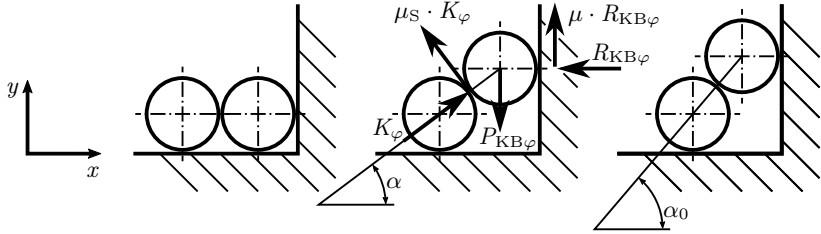


Abb. 2.24: Aufstiegsvorgang und Verlauf des Keilwinkels nach [Mup01]

Die Axialkraft

$$R_{KB\varphi} = \frac{\cot(\alpha) - \mu_S}{1 - \mu_S \cdot \mu + (\mu_S + \mu) \cdot \cot(\alpha)} \cdot P_{KB\varphi}, \quad (2.12)$$

während des Aufstiegsvorgangs (im entsprechenden KB) kann in Abhängigkeit des Drehwinkels φ der Trommel und der Seilkraft F_{Sk} in Lage k anhand des Kräftegleichgewichts abgeleitet werden.

Dazu werden folgende weitere Berechnungen verwendet:

$$\cot(\alpha) = \frac{2 \cdot \varphi_{KB} \cdot d - (2 \cdot d - e) \cdot \varphi}{\varphi \cdot e \cdot \tan(\alpha_0)}, \quad (2.13)$$

$$\tan(\alpha_0) = \sqrt{4 \cdot \left(\frac{d}{e}\right)^2 - 1}, \quad (2.14)$$

$$P_{KB\varphi} = \frac{F_{Sk}}{\sqrt{r_{k-1} \cdot \left(r_{k-1} + \frac{\varphi}{\varphi_{KB}} \cdot e \cdot \tan(\alpha_0)\right) + (1 + \varphi^2) \cdot \left(\frac{e \cdot \tan(\alpha_0)}{2 \cdot \varphi_{KB}}\right)^2}} \quad \text{und} \quad (2.15)$$

$$r = r_{k-1} + \frac{\varphi}{\varphi_{KB}} \cdot \frac{e}{2} \cdot \tan(\alpha_0). \quad (2.16)$$

Insgesamt ergibt sich damit die maximale Linienlast

$$R_{KB} = \frac{\cot(\alpha) - \mu_S}{(1 - \mu_S \cdot \mu + (\mu_S + \mu) \cdot \cot(\alpha))} \cdot \frac{F_{Sk}}{\sqrt{r_{k-1} \cdot \left(r_{k-1} + \frac{\varphi}{\varphi_{KB}} \cdot e \cdot \tan(\alpha_0)\right) + (1 + \varphi^2) \cdot \left(\frac{e \cdot \tan(\alpha_0)}{2 \cdot \varphi_{KB}}\right)^2}} \quad (2.17)$$

im Aufstiegsbereich.

Allgemein ist die Höhendifferenz für runde Seilquerschnitte

$$\Delta y_{\text{rund}} = \frac{e}{2} \cdot \tan(\alpha_0) \quad (2.18)$$

für den PB aus Gleichung (2.16) abgeleitet. Der Wickelradius in Lage k

$$r_k = r_{k-1} + \Delta y_{\text{rund}} \quad (2.19)$$

ergibt sich daraus. Damit wird die Axialkraft im Parallelbereich

$$R_{PB} = \frac{\cot(\alpha_0) - \mu_S}{(1 - \mu_S \cdot \mu + (\mu_S + \mu) \cdot \cot(\alpha_0)) \cdot \left(r_{k-1} + \frac{e \cdot \tan(\alpha_0)}{2}\right)} \cdot F_{Sk} \quad (2.20)$$

berechnet. Dafür werden folgende Variablen verwendet:

- φ Wickelwinkel,
- φ_{KB} Winkel Kreuzungsbereich (KB) (entspricht Winkel Aufstiegsbereich),
- φ_{PB} Winkel Parallelbereich (PB)
- μ_S Reibungskoeffizient zwischen den Umwicklungen und
- μ Reibungskoeffizient zwischen Seil und Trommel.

Insgesamt wird die Belastung der Bordscheiben in Lage k

$$R_k = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \frac{F_{Sk}}{r_k} \int_0^{\varphi_{KB}} \frac{\cot(\alpha) - \mu_S}{1 - \mu_S \cdot \mu + (\mu_S + \mu) \cdot \cot(\alpha)} d\varphi + \frac{\varphi_{PB}}{2 \cdot \pi} \cdot \frac{\cot(\alpha_0) - \mu_S}{1 - \mu_S \cdot \mu + (\mu_S + \mu) \cdot \cot(\alpha_0)} \cdot \sum_{i=k}^l \frac{F_{Si}}{r_i}, \quad (2.21)$$

mit:

l Lagenanzahl,

durch die Berücksichtigung von sowohl Parallel- und Aufstiegsbereich als auch der Berücksichtigung der mehrlagigen Bewicklung berechnet.

Von MUPENDE angegeben und von OTTO weiter untersucht werden nicht rotationssymmetrische Verformungen des Mantels aufgrund der unterschiedlichen Gestalt des Wickelpaketes im PB und KB [Mup01] und [Ott04].

Da die Ursache in den unterschiedlichen Seilanordnungen liegt, wird neben den Wickelradien auch die Wickelhöhe angegeben. Diese bezieht sich im Gegensatz zum Wickelradius nicht auf die Drehachse der Trommel. Vielmehr wird hier der Abstand zwischen Trommeloberfläche und der Mitte der Umwicklung erfasst. Damit ergibt sich die Wickelhöhe für die Lage k

$$y_{PB,k} = \frac{1}{2} (d + (k - 1) \cdot e \cdot \tan(\alpha_0)) \quad (2.22)$$

im PB und

$$y_{KB,k} = \left(k - \frac{1}{2}\right) \cdot d \quad (2.23)$$

im KB.

Den Übergang zwischen den beiden Zuständen gibt OTTO an [Ott04]. Die kontinuierliche Wickelhöhe

$$y_k(\varphi) = \frac{1}{2} \cdot d \left(1 + (l-1) \cdot \sqrt{4 - \frac{e^2}{d^2} \cdot F_\varphi^2} \right) \quad (2.24)$$

bei einem rundem Seilquerschnitt berechnet sich mit:

$$F_\varphi = \begin{cases} 1 & \text{im Parallelbereich und} \\ \frac{\varphi_{KB} - 2 \cdot \varphi}{\varphi_{KB}} & \text{im Kreuzungsbereich.} \end{cases}$$

DIETZ, HENSCHEL, MUPENDE, OTTO und SCHWARZER berechnen weiterführend zu den Belastungen der Trommel auch deren Beanspruchungen. Die Trommel wird dazu mithilfe entsprechender mechanischer Grundkörper der Berechnung zugänglich gemacht. MUPENDE erweitert die Berechnungen von DIETZ dahingehend, dass in einem gekoppelten System die Wechselwirkungen von Mantel, Stützscheiben und Bordscheiben über eine Kopplungsgeometrie Berücksichtigung finden. SCHWARZER führt die Untersuchungen vor allem bezüglich anders ausgeprägter Seileigenschaften bei Hybridseilen aus [Die71], [Hen99], [Mup01], [Ott04] und [Sch11].

LOHRENGEL ET AL. gehen in [LSW13] und [LSSW15] ebenso wie die Richtlinie [FEM5.024] auf die Wichtigkeit der genauen Kenntnis der Seileigenschaften ein. So kann es durch Faserseile zu signifikant höheren Lasten auf Bordscheiben und Mantel kommen [FEM5.024]. Ein Grund für die anderen Belastungen durch ein Faserseil ist unter anderen durch einen anders ausgeprägten Entlastungseffekt

$$\Delta F_{L,k} = p_{k+1} \cdot \frac{\sqrt{\frac{\pi}{4} \cdot d_{\max} \cdot d_{\min} \cdot f_{\text{real}}}}{2 \cdot r_{\text{Ell},k}} \cdot \frac{E_{\text{SL}}}{E_{\text{SQ}}} \cdot A_{\text{real}} \quad (2.25)$$

mit:

- d_{\min} kleiner Durchmesser der Ellipse und
- d_{\max} großer Durchmesser der Ellipse

des Seils gegeben [LSSW15]. Der andere Wickelradius eines elliptischen Seilquerschnitts

$$r_{\text{Ell,PB},k} = a_T + \frac{h + d_{\min}}{2} + \frac{k-1}{2} \cdot \sqrt{d_{\min}^2 \cdot \left(4 - \frac{e^2}{d_{\max}^2}\right)} \quad (2.26)$$

wird dazu für den PB berechnet. Der Wickelradius

$$r_{\text{Ell,KB},k} = a_T + \frac{h + d_{\min}}{2} + \left(k - \frac{1}{2}\right) \cdot d_{\min} \quad (2.27)$$

entsprechend für den KB [LSSW15].

2.4 Das Wickelpaket als Ergebnis des Zusammenspiels von Seil und Trommel

In diesem Kapitel wird das Zusammenspiel von Seil und Trommel mit den daraus resultierenden Anforderungen an die Teilsysteme beschrieben. Dazu wird eine Recherche zu Angaben in der Literatur durchgeführt und es werden die Probleme im Zusammenspiel beschrieben.

Die Berechnung des Wickelpaketes kann aus verschiedenen Gründen interessant sein:

- Berechnung der Seillänge, wenn dies für die Anwendung von Bedeutung ist oder zur Sicherstellung einer anforderungsgerechten Seillänge.
- Kenntnis des Wickelradius zur Bestimmung von Antriebs- und/oder Bremsmomenten.
- Forderung nach platzsparender Trommelausführung.
- Sicherstellung der normgerechten Auslegung der Bordscheibenhöhe.

Für alle genannten Punkte ist die Bestimmung des Wickelradius erforderlich.

2.4.1 Seillänge auf der Seiltrommel

Die Seillänge ist in Anwendungen von besonderer Bedeutung, in denen mehrere Seile parallel eingesetzt werden. VERREET berichtet von einem Zwillingshubwerk, bei dem zwei Seile mit unterschiedlichen Seildurchmessern (jeweils innerhalb der zulässigen Toleranz) eingesetzt wurden. In Folge der Mehrlagenwicklung entstand eine Längendifferenz, die durch eine Wippe nicht ausgeglichen werden und somit das System nicht betrieben werden konnte [Ver18c]. Andere derartige Anwendungen sind seilbetriebene Roboter. Auch hier ist es wichtig, die auf- oder abzuwickelnde Seillänge zu kennen. SCHMIDT und POTT beschreiben dazu den Effekt der Deformation des Seilquerschnitts als Einflussfaktor für auftretenden Längendifferenzen [SP16].

Zur Berechnung der Seillänge konnten verschieden Angaben gefunden werden. In einer Angabe aus der Industrie wird die Seillänge

$$L_S = \left(\frac{L}{e} - a_{H,S} \right) \cdot (D + d + 0,866 \cdot d \cdot (l - 1)) \cdot l \cdot \pi \quad (2.28)$$

mit:

$$a_{H,S} = \begin{cases} 1 & \text{für Helicoidalrillung und} \\ 0,5 & \text{für System-Rillung} \end{cases} \quad (2.29)$$

berechnet. Durch die Korrektur $a_{H,S}$ wird der Tatsache Rechnung getragen, dass die Rillung mit einer Steigung um den Mantel läuft. Durch den Faktor $\sin(120^\circ) = 0,866$ werden die Durchmesser im PB angenommen. Dieser Faktor berücksichtigt jedoch nicht den Einfluss des Rillenabstands e auf die Durchmesser. Insgesamt wird somit vereinfacht nur der PB berücksichtigt [Zol].

Eine andere Vereinfachung schlägt VERREET vor [Ver17]. Die Seillänge

$$L_S = u \cdot (D + d + (l - 1) \cdot d) \cdot l \cdot \pi \quad (2.30)$$

mit:

u Anzahl Umwicklungen in einer Lage

berücksichtigt ausschließlich den KB. Eine Möglichkeit, beide Berechnungen zusammenzuführen, ist die Gewichtung der beiden Ergebnisse mit den Bogenlängen des Parallel- und Kreuzungsbereichs [Ver17].

Eine weitere Berechnung ist in der Vorschrift [TAS] angegeben. Dazu werden zuerst die Wickelradien

$$r_1 = \frac{D}{2} + \frac{d}{2} \quad (2.31)$$

$$r_2 = r_1 + 0,9 \cdot d \quad (2.32)$$

$$r_l = r_{l-1} + 0,9 \cdot d \quad (2.33)$$

der ersten beiden und der letzten Lage angegeben.

Der Faktor 0,9 ist dabei etwas größer im Vergleich zu $\sin(120^\circ) = 0,866$. Dies kann entweder aufgrund einer größeren Rundung gewählt worden sein, oder um den Unterschied zum größeren Wickelradius im KB auszugleichen.

Die nutzbare Seillänge wird mit dem jeweiligen Wickelradius berechnet. Dabei wird in der ersten Lage die Anzahl der Reservewindungen bei der Berechnung der nutzbaren Umwicklungen nicht berücksichtigt. Damit wird ab der zweiten Lage die Seillänge der Lage k

$$L_k = 2 \cdot \pi \cdot r_k \cdot u \quad (2.34)$$

berechnet. Somit wird in dieser Angabe kein Ausgleich zur Reduzierung der Umwicklungen um eine Umwicklung aufgrund der Steigung wie in Gleichung (2.29) vorgenommen.

Da für den Wickelradius der Trommeldurchmesser bei üblichen D/d -Verhältnissen und kleinen bis mittleren Lagenzahlen maßgeblich ist, liefern alle Näherungen brauchbare Werte. Eine weitere Präzisierung wäre mit der Nutzung der kontinuierlichen Wickelradien nach OTTO für runde Seilquerschnitte möglich [Ott04]. Die Methode mit gewichteten Wickelradien nach VERREET ließe

sich auch mit den Wickelradien für deformierte Faserseile nach LOHRENGEL ET AL. durchführen [LSSW15]. In allen Fällen wird oder würde mit idealen geometrischen Elementen gerechnet.

2.4.2 Geometrie der Trommel

Die geometrische Auslegung von Trommeln ist Gegenstand von Normen und Richtlinien und ist auch an anderen Stellen zu finden. Am häufigsten finden sich dabei Angaben zur Höhe der Bordscheiben. Weiterhin sind zum Teil Angaben zur Trommellänge zu finden. Diese werden anschließend vorgestellt.

Die Höhe der Bordscheibe wird nicht explizit genannt. Vielmehr wird der einzuhaltende Überstand

$$\Delta r_B = \frac{D_B}{2} - r_1 - \frac{d_{\min}}{2} = \frac{D_B}{2} - r_{O,1} \quad (2.35)$$

mit:

d_{\min} Seildurchmesser in radialer Richtung

der Bordscheibe über dem Wickelpaket angegeben (Abb. 2.25).

Diese Angabe erfolgt zum Teil gemessen zur Seilmitte und zum Teil zur Oberfläche des Seilpaketes. Zur besseren Vergleichbarkeit werden alle Angaben auf die Wickelpaketoberfläche bezogen. Δr_B ist dazu in Tab. 2.1 als ein Vielfaches von d angegeben.

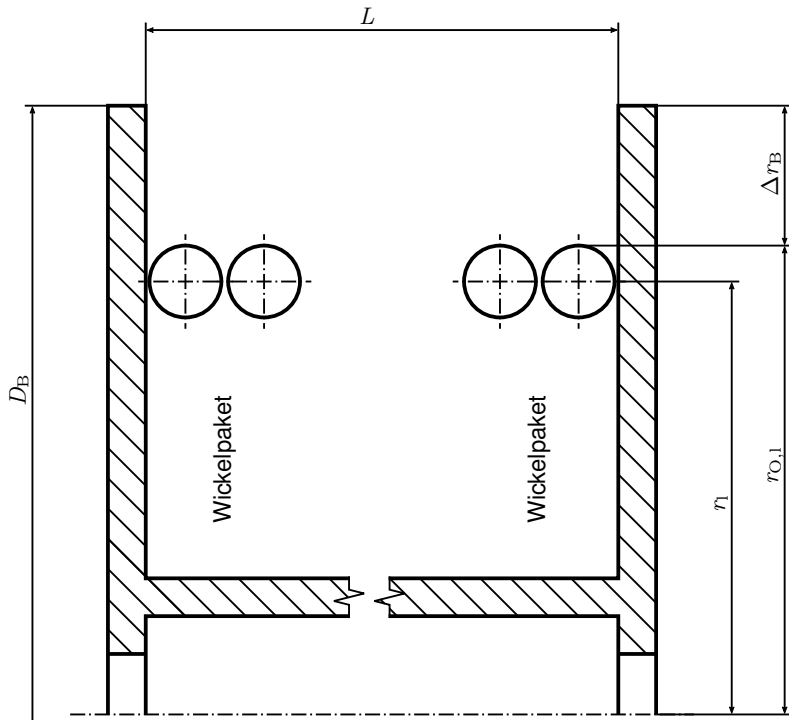


Abb. 2.25: Allgemeine Darstellung eines mehrlagigen Wickelpaketes auf einer Seiltrommel

Tab. 2.1: Zusammenfassung ausgewerteter Normen bezüglich Angaben zum Wickelpaket

Typ	Nr.	Titel	Jahr	Δr_B in d
AS	1418-1	Cranes, hoists and winches [AS1418.1]	2002	1,5
DIN	15020	Grundsätze für Seiltriebe [DIN15020-1]	1974	1,5
DIN EN	13000	Krane – Fahrzeugkrane [DINEN13000]	2014	1,5
DIN EN	13135	Krane - Sicherheit [DINEN13135]	2013	1,5
DIN EN	13711	Winden für den Schiffsbetrieb [DINEN13711]	2002	1,5
DIN EN	13852-1	Krane – Offshore-Krane – Teil 1: Offshore-Krane für allgemeine Verwendung [DINEN13852-1]	2014	2,5
DIN EN	13852-2	Krane – Offshore-Krane – Teil 2: Schwimmende Krane [DINEN13852-2]	2005	2,5 ³
DIN EN	14492-1	Krane - Kraftgetriebene Winden und Hubwerke - Teil 1: Kraftgetriebene Winden [DINEN14492-1b]	2010	1,5 und 2 ⁴
DIN EN	14492-1	Krane - Kraftgetriebene Winden und Hubwerke - Teil 1: Kraftgetriebene Winden [DINEN14492-1a]	2015	2
DIN EN	14492-2	Krane - Kraftgetriebene Winden und Hubwerke - Teil 2: Kraftgetriebene Hubwerke [DINEN14492-2]	2016	1,5

Fortsetzung auf Folgeseite

³ Alternativ kann auch eine Schutzeinrichtung das Ablaufen verhindern.⁴ Beide Angaben sind enthalten.

Tab. 2.1 : Zusammenfassung der bezüglich Angaben zum Wickelpaket ausgewerteten Normen (Fortsetzung)

Typ	Nr.	Titel	Jahr	Δr_B in d
DIN ISO	3078	Ladewinden [DINISO3078]	1988	2,5 ⁵
DIN ISO	3730	Schiffbau und Meerestechnik – Verholwinden (Mooringwinden) [DINISO3730]	2013	1,5 und 1 ⁶
DIN ISO	6115	Fischnetzwinden [DINISO6115]	1989	2 und 4 ⁷
DIN ISO	6555	Hangerwinden [DINISO6555]	1989	2,5
DIN ISO	7364	Decksmaschinen Fallreepwinden [DINISO7364]	1985	1,5
DNV	2.22	Lifting Appliances [DNVNo.2.22]	2011	2
FEM	5.024	Leitfaden: Sicherer Einsatz von Hochfesten Faserseilen auf Fahrzeugkränen [FEM5.024]	2017	1,5 ⁸
ISO	7365	Shipbuilding and marine structures- Deck machinery - Towing winches for deep sea use [ISO 7365]	2012	1,5
ISO	9089	Marine structures - Mobile offshore units Anchor winches [ISO 9089]	1989	1,5 ⁹

Fortsetzung auf Folgeseite

⁵Wenn nicht spezielle Vorrichtungen das Ablaufen des Seils verhindern.⁶1,5 · d für Drahtseile bzw. 1 · d für Faserseil auf einer Trommel mit normaler Kapazität. Auf einer Trommel mit großer Kapazität muss die gesamte Seillänge ein weiteres Mal komplett Platz haben.⁷2 · d mit Wickelvorrichtung und 4 · d ohne.⁸Des gesetzten Seils.⁹Wenn keine Wickelhilfe vorhanden ist.

Tab. 2.1: Zusammenfassung der bezüglich Angaben zum Wickelpaket ausgewerteten Normen (Fortsetzung)

Typ	Nr.	Titel	Jahr	Δr_B in d
ISO	16625	Cranes and hoists — Selection of wire ropes, drums and sheaves (Draft) [ISO 16625]	2011	0,5
SEB	666221	Seiltrommeln Anschlußmaße und technische Anforderungen [SEB 666221]	1992	1,5
TAS		Technische Anforderungen an Schacht- und Schrägförderanlagen [TAS]	2005	1,5

Aus den Angaben in [Zol] wird ersichtlich, dass an dieser Stelle $\Delta r_B = 1,5 \cdot d$ im KB berechnet wird. Die Seilquerschnitte werden also direkt aufeinander gestapelt, und über der obersten Lage sind noch eineinhalb Seildurchmesser Abstand zum Ende der Bordscheibe.

Neben der Angabe zum Überstand Δr_B konnten keine direkten Angaben dazu gefunden werden, wie die Wickelhöhe des mehrlagigen Wickelpaketes zu berechnen ist. Lediglich in der Norm [DINISO3730] steht eine Angabe zur Anordnung der Querschnitte der Umwicklungen. Bei der Berechnung der Trommellänge sollen die Umwicklungen direkt übereinanderliegen (KB). Dies kann auf die Berechnung der Seillänge und die daraus resultierende Trommellänge bezogen sein. Ansonsten finden sich weder Angaben, ob sich der Überstand Δr_B auf den PB oder den höheren Fall den KB bezieht, noch wie die Höhe des Wickelpaketes berechnet werden kann.

Zur Trommellänge finden sich folgende Angaben:

- Die Trommel ist so zu dimensionieren, dass das komplette Seil mit ausreichend Abstand zum Außendurchmesser der Bordscheiben darauf passt [DIN15020-1].
- Es dürfen maximal drei Lagen auf die Trommel gewickelt werden. Die Trommellänge ist dementsprechend so zu, dass dieses Kriterium eingehalten wird [DINISO7364] und [DINISO6555].
- Die Trommellänge ist so zu gestalten, dass mindestens 50 m auf die erste Lage passen [ISO 7365].

Andere Angaben zur Berechnung von Wickelhöhen finden sich im Bereich des Wickelns elektrischer Spulen. HAGEDORN ET AL. beschreiben verschiedene Möglichkeiten, wie elektrische Spulen gewickelt werden können [HSF16]. Die orthozyklische Wicklung entspricht der Wicklung nach der System-Rillung. Diese zeichnet sich durch einen optimalen Füllfaktor auf der Spule im PB aus. Es gibt jedoch lediglich einen KB. Im Verlauf der Wicklung der Lagen wandert dieser und ist im Übergang zwischen den Lagen zu erkennen (Abb. 2.26) [HSF16].

Die Wickelhöhe im PB ergibt sich aus der Höhe zwischen zwei Lagen von $\sin(60^\circ) \cdot d$, da kein Abstand zwischen den einzelnen Umwicklungen vorliegt.

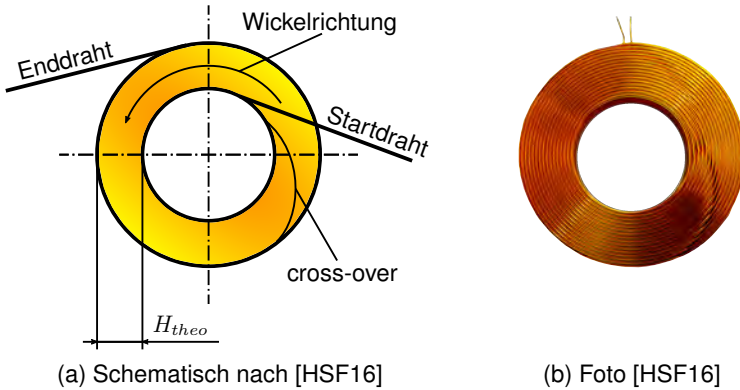


Abb. 2.26: Gewickelte Spule

Abweichend davon wird die Höhe

$$H_{\text{theo}} = (1 + (l - 1) \cdot \sin(60^\circ)) \cdot d + 10\% \quad (2.36)$$

mit:

- l Lagenzahl und
- d Drahtdurchmesser

des gesamten Paketes als theoretischer Wert angegeben. Die prozentuale Korrektur basiert auf Erfahrungswerten. In Abhängigkeit von Wickelbreite, Lagenzahl und Drahtdurchmesser kann dabei die Abweichung statt 10 % auch im Bereich von 5 % bis 10 % liegen.

Bei der aufgrund der Einfachheit wirtschaftlichen Herstellung einer wilden Wicklung ist die Ordnung wesentlich geringer. HAGEDORN ET AL. geben in diesem Fall die Wickelhöhe

$$H_{\text{wild}} = d^2 \cdot \frac{u}{L} \quad (2.37)$$

mit:

- u Wicklungszahl und
- L Wickelbreite

an. Um dennoch ein Wickelergebnis ohne Einschneiden von oberen in darunterliegende Lagen zu erhalten wird die Wicklung mit einer Steigung von $1,5 \cdot d$ bis $3 \cdot d$ verlegt.

2.4.3 Wickelqualität

Um ein gutes Wickelergebnis zu erzielen, müssen Seil und Trommel zueinander passen. Dies bezieht sich auf der einen Seite auf das Verhältnis von Seildurchmesser (Kapitel 2.2.3) zu Rillenbreite (Kapitel 2.3.1). Auf der anderen Seite müssen auch die Eigenschaften des Seils für sich betrachtet werden. Mit dem Seildurchmesser hängt dabei auch die Frage zusammen, ob sich ein Seil derart deformiert, dass es nicht mehr zur Rillung passt. HEINZE ET AL. stellen einen Zusammenhang zwischen der Deformation und einem geringen Quererelastizitätsmodul fest [HSL12]. LOHRENGEL ET AL. geben für den Quererelastizitätsmodul einen Wert von $E_{SQ} = 400 \text{ MPa}$ als erforderlich an, um ein gutes Wickelergebnis auf einer Trommel mit System-Rillung zu erhalten [LSW11].

Wenn Seil und Trommel nicht zueinander passen, kann es Wickellücken geben (Abb. 2.27). Dies bedeutet, dass der Abstand zwischen zwei Umwicklungen größer ist als der vorgesehene Abstand in Höhe des Rillenabstands e .

Im ungünstigsten Fall führt dies zum Einschneiden des Seils in darunterliegende Lagen. Dann wird die Lücke mit einer Umwicklung der folgenden Lage gefüllt, und diese drückt die unteren noch zur Seite. Dies kann sowohl bei Draht- (Abb. 2.28) als auch bei Faserseilen der Fall sein (Abb. 2.29).

Um ein Einschneiden zu verhindern, ist festes Aufwickeln unterer Lagen erforderlich [FEM5.016]. Dies kann jedoch nicht in allen Anwendungen gewährleistet werden. Bei der Demontage von Windkraftanlagen oder Anwendungen im Offshorebereich kommt es typischer Weise zu dem Fall, dass das Seil ohne Last aufgewickelt und anschließend eine Last angehängt wird, um diese abzulassen. Dies wird auch als Reverse Lifting bezeichnet [DNV-RP-H201] und [CC19]. Die Problematik kann aber auch entstehen, wenn die Bordscheiben zu



Abb. 2.27: Wickellücken zwischen den Umwicklungen [LSW13]

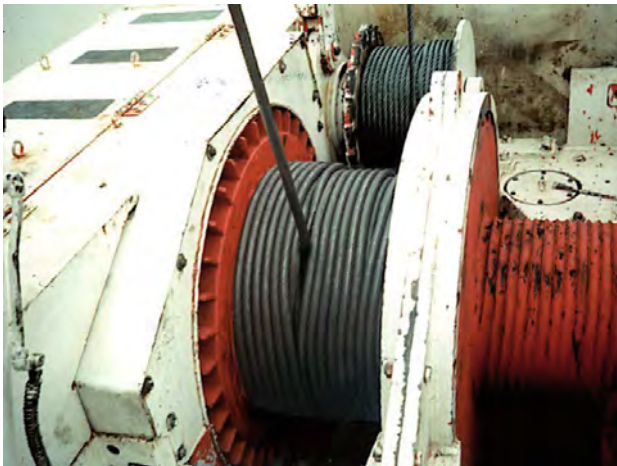


Abb. 2.28: In das Wickelpaket eingeschnittenes Drahtseil [Ver18d]

elastisch an den Mantel angebunden sind [DNV-RP-H201].

Problematisch ist das Einschneiden, da es neben dem schlechten Wickelergebnis auch zu Schäden am Seil und/oder an der Trommel kommen kann.



Abb. 2.29: In das Wickelpaket eingeschnittenes Faserseil [Dij18]

Für den Einsatz von Faserseilen ist besonders zu beachten, wie das Seil sich wickeln lässt [DNV-RP-H201].

Für die Wickelqualität des Faserseils auf der Trommel ist nach der Richtlinie [FEM5.024] der Kranhersteller verantwortlich. Die Richtlinie [DNV-RP-H201] gibt zusätzlich an, dass es zu einer Verbesserung der Wickelqualität nach dem Setzen des Faserseils kommt.

Die Notwendigkeit der Abstimmung zwischen Seil und Trommel nennen ERNST und MUPENDE in [EM18]. Von besonderer Bedeutung sei dabei die Abstimmung von Seildurchmesser und Rillung.

Neben den in Kapitel 2.2.3 genannten Konzepten ([Lie] und [LSW], [LSSW15] (Abb. 2.30)) für Faserseile gibt es weitere.

CRAWFORD beschreibt eine Trommel, die von der klassischen Konstruktion abweicht (Abb. 2.31).

Neben den anders geformten Bordscheiben ist ein Unterschied zur klassischen Konstruktion mit Zylinderscheiben als Bordscheiben, dass es zu mehr Seilkreuzungen zwischen den Lagen kommt [Cra].

Alle drei Systeme haben eine Gemeinsamkeit. Die Oberflächegeometrie ist



Abb. 2.30: Trommelkonzept des Instituts für Maschinenwesen [SLW18]

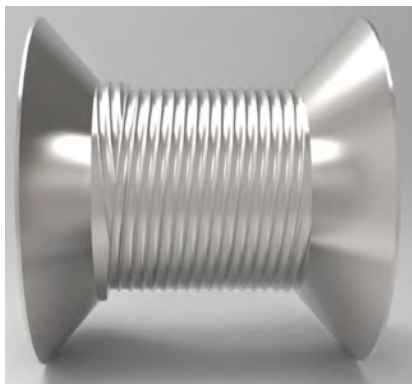


Abb. 2.31: Trommelkonzept von Deep Tek [Cra14]

speziell auf sich deformierende Faserseile abzustimmen. Andernfalls würde die Oberfläche von Trommel (Rillung) und Bordscheiben nicht zum Seil passen.

2.5 Laser-Profil-Scanner

Zur Untersuchung der Seilquerschnitte und des Wickelpakets werden unter anderem auch Laser-Profil-Scanner (LPS) eingesetzt. Daher soll die Funktionsweise an dieser Stelle kurz erläutert werden.

Das Grundprinzip ist das der optischen Triangulation. Das Licht einer Laserdiode wird aufgefächert, um vom zu untersuchenden Objekt reflektiert zu werden. In der Empfangsoptik wird das reflektierte Licht fokussiert und gefiltert, bevor es mit der Sensormatrix ausgewertet wird. Der Abstand (z -Wert) wird in der Sensorspalte mit

$$b_{1,2} = \frac{a_{1,2}}{\tan(\alpha_{1,2})} \quad (2.38)$$

berechnet (Abb. 2.32).

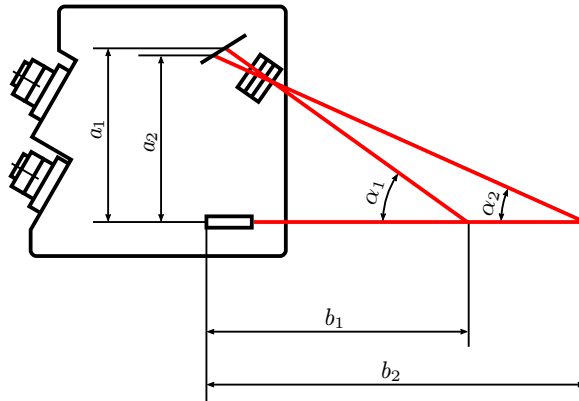


Abb. 2.32: Funktionsprinzip optische Triangulation nach [ER15]

Durch die Auswertung der verschiedenen Matrixzeilen kann die Reflexion einem x -Wert zugeordnet werden. Dadurch entsteht ein zweidimensionaler Profilverlauf. Durch relative Bewegung von Sensor und Objekt kann ein dreidimensionales Profil erstellt werden [ER15]. Der Aufbau eines in dieser Arbeit verwendeten LPS ist in Abb. 2.33 zu sehen.

Die Notwendigkeit einen Profilsensor einzusetzen und keinen punktuell arbeitenden Lasersensor liegt in der Tatsache begründet, dass durch den Seilverlauf in der Mehrlagenwicklung der höchste Punkt einer Umwicklung in Abhängigkeit der Winkelposition der Trommel variiert (vgl. Abb. 2.20). Durch die Höheninformation über die gesamte Breite kann später in der Auswertung der axiale Punkt einer Umwicklung identifiziert werden (Kapitel 3.2.1).

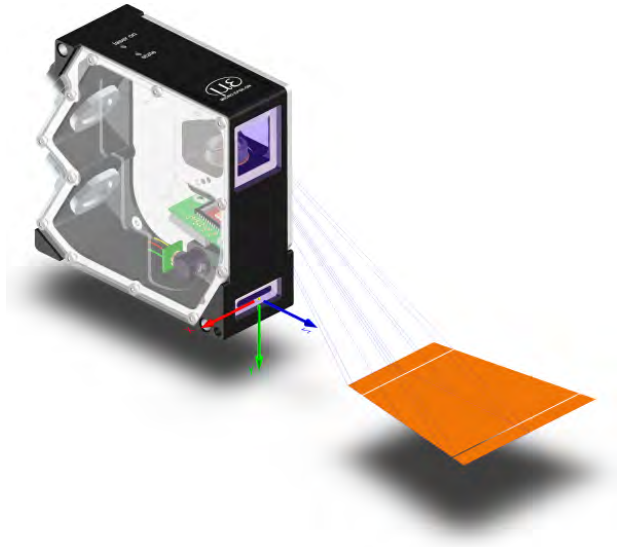


Abb. 2.33: Aufbau Laser-Profil-Scanner [Mic14]

LPS werden bereits in verschiedenen Anwendungen zur Untersuchung des Wickelverhaltens verwendet. Für Glasfaserkabel wird durch die Überwachung sichergestellt, dass eine ordentliche Wickelung weder zu straff noch zu locker ausgeführt wird [Mic17].

MICHAEL nutzt LPS zur Untersuchung von Seilscheibe (Rille) und Seil. Die aufgenommen Punkte werden zuerst in eine Funktion überführt und diese anschließend ausgewertet. So werden Kennwerte zum Seilquerschnitt gewonnen [Mic11].

Am IMW wurde ein System zur Untersuchung von Seilquerschnitten und dem aufgewickelten Seil auf eine Trommel entwickelt. Dazu kommen bis zu drei LPS in einem Aufbau zum Einsatz [Sch16], [LSE⁺17], [SLW18], [LSW18] und [SW18].

Untersuchungen zum Seilquerschnitt werden auch von DIJKSTRA genannt. Dabei wird die Deformation anhand der Ovalität beschrieben. Zudem werden die Durchmesser d_{\min} und d_{\max} und die Querschnittsfläche angegeben. Die genaue Ermittlung der Kennwerte wird nicht weiter erläutert [Dij18].

Von CRAIG und CANNELL wird die Wickelqualität von mehrlagig bewickelten Trommeln mit LPS untersucht [CC19]. Dabei gibt es jedoch kein Kriterium, anhand dessen das Ergebnis bewertet wird.

2.6 Ergebnisdarstellung

Quantitative Ergebnisse werden in Form von Boxplots dargestellt, um einen guten Eindruck über die Lage und die Streuung der Daten zu bekommen (Abb. 2.34) [Has18].

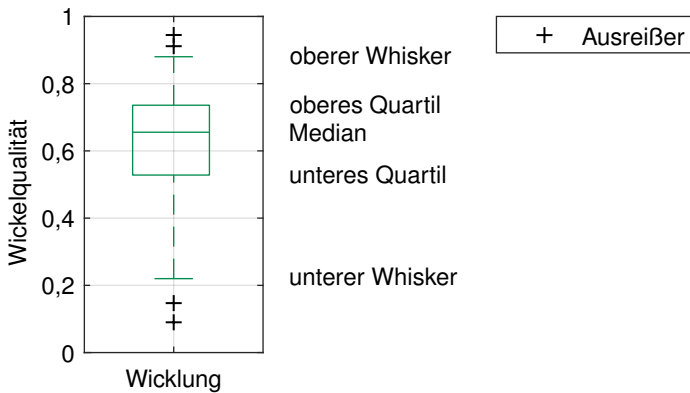


Abb. 2.34: Beispiel eines Boxplots mit Angabe von Ausreißern

Durch den gesamten Plot werden alle Beobachtungen n_B repräsentiert. Die Box ist durch das untere Quartil q_1 und das obere Quartil q_3 begrenzt. Das bedeutet, dass ein Viertel der Werte unterhalb und eines oberhalb liegen und damit die Hälfte aller Werte innerhalb der Box. Der Wert des Medians q_2 ist innerhalb der Box eingezeichnet.

An der Box sind der obere und der untere Whisker zu sehen. Diese geben ein zusätzliches Intervall bezüglich der Streuung der Daten an. Die untere Grenze

$$q_1 - 1,5 \cdot (q_3 - q_1) \quad (2.39)$$

und die obere Grenze

$$q_3 + 1,5 \cdot (q_3 - q_1) \quad (2.40)$$

beschreiben den maximalen Abstand der Whisker. Tatsächlich eingezeichnet werden sie an der Position der jeweils nächstgelegenen Beobachtung, die innerhalb der Grenzen liegt. Diese Punkte werden als oberer Anrainer a_o beziehungsweise unterer Anrainer a_u bezeichnet. Datenpunkte außerhalb werden als Ausreißer betrachtet [SS16].

2.7 Forschungsfrage

Der in der Einleitung (Kapitel 1) und dem Stand der Technik (Kapitel 2) beschriebene Zustand in der Nutzung von Faserseilen in der Mehrlagenwicklung führt zu folgender zentraler Forschungsfrage:

Wie können Faserseil und mehrlagig bewickelte Seiltrommel optimal als System genutzt werden und wie kann die Kompatibilität sichergestellt werden?

Daraus lassen sich folgende Aufgaben ableiten:

- Analyse des **Wickelpaketes**: Beschreibung des experimentell zu untersuchende Wickelpakets.
- Analyse des **Seilquerschnitts**: Beschreibung des von der Kreisform abweichende Seilquerschnitts.
- Berechnung des **Wickelpaketes**: mathematische Modellierung des Wickelpakets.
- Berechnung der **Wickelqualität**: Vergleich von Experiment und Modell zum Wickelpaket mit Ableitung der Wickelqualität.

Zur Beantwortung der Frage und Bearbeitung der abgeleiteten Aufgaben wird nach der Übersicht auf Abb. 2.35 vorgegangen.

Die Antwort, wie das Zusammenspiel von Seil und Seiltrommel in einem Sys-

tem funktioniert, kann anhand des Wickelverlaufs und der Wickelqualität gefunden werden (**Ausgabe**, Abb. 2.35). Zur Ermittlung der Antwort müssen die Parameter der einzelnen Komponenten Seil und Trommel und der Anwendung bekannt sein (**Eingabe**, Abb. 2.35).

Die eigentliche Beantwortung der Frage kann auf verschiedenen Wegen erfolgen. Einer ist die experimentelle Untersuchung des tatsächlichen Zusammenspiels der Komponenten im System (**Wickelversuch**, Abb. 2.35). Der zweite Weg beginnt mit der experimentellen Untersuchung des Zusammenspiels in Form eines vereinfachten **Querdruckversuchs**. Die beiden experimentellen Teile werden im Kapitel 3 beschrieben. Darin wird im Fall des **Wickelversuchs** der Verlauf des Seils auf der Seiltrommel beschrieben. Weiterhin wird das Seil, wie es von der Seiltrommel kommt, analysiert und seine irreversible Seil deformation in Form der relativen Rundheit beschrieben. Der **Querdruckversuch** liefert Erkenntnisse sowohl über die irreversible Deformation als auch über die reversible elastische Deformation des Seils in Form des Querelastizitätsmoduls.

Ausgehend von diesen Ergebnissen wird das Modell des Wickelpaketes aufgebaut. Der Teil der **Berechnung** wird im folgenden Kapitel 4 beschrieben. Anschließend wird die analytische Berechnung anhand der Versuchsergebnisse validiert.

Modell und Experiment werden in Kapitel 5 zusammengeführt und anhand von Beispielen beschrieben.

Die Anwendung der gezeigten Methoden wird im abschließenden Kapitel 6 anhand eines Praxisbeispiels und der Gewinnung von Auslegungshinweisen für mehrlagig bewickelte Seiltrommel gezeigt. Dabei werden Vorschläge für die Gestaltung von Seiltrommeln und Seilen gemacht, wenn diese eine wesentliche Querschnittsdeformation aufweisen. Die Trommeln sollen dafür hauptsächlich aus den Grundkörpern Trommelmantel und zwei Bordscheiben bestehen.

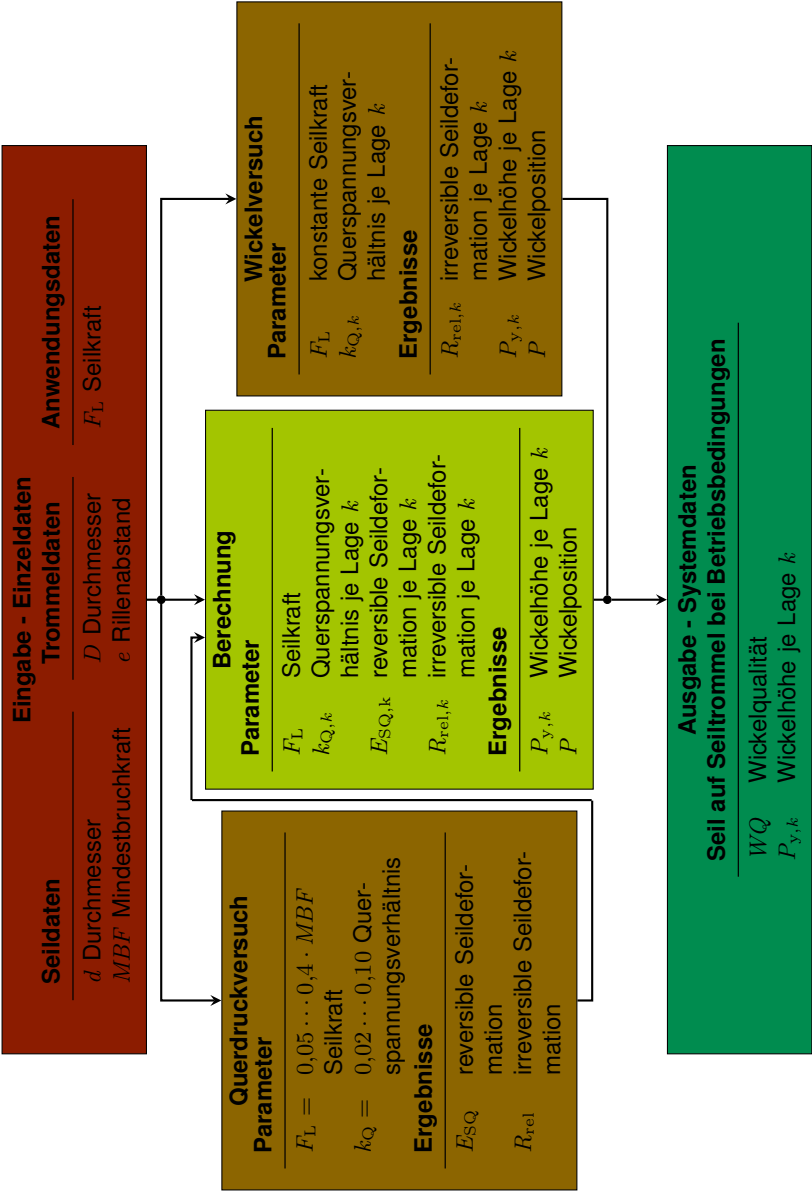


Abb. 2.35: Übersicht durchzuführende Untersuchungen zu Seilen auf mehrla-gigen Seiltrommeln

3 Experimentelle Untersuchungen

In diesem Kapitel wird anhand von verschiedenen Experimenten analysiert, wie der Aufbau des mehrlagigen Wickelpaketes auf der Seiltrommel abläuft. Dazu soll beginnend vom eigentlichen Wickelvorgang der experimentelle Aufbau abstrahiert werden, um zu einem einfachen Versuchsaufbau mit gut reproduzierbaren Ergebnissen zu gelangen.

Im ersten Schritt wird der Wickelvorgang von Draht- und Faserseilen auf gegebenen mehrlagigen Seiltrommeln mithilfe von Laser-Profil-Scannern (LPS) untersucht. Das Wickelpaket wird kontinuierlich aufgezeichnet, um das Ergebnis der gesamten Seildeformation im Wickelpaket festzuhalten.

Der zweite Schritt ist die Analyse der Seilquerschnitte am von der Seiltrommel ablaufenden Seil. Untersucht werden die Veränderung der Durchmesser des Seilquerschnitts und die damit einhergehende Deformation sowie die resultierende Fläche der Querschnitte. Mit diesen Ergebnissen wird die bleibende also die irreversible Deformation der Seilquerschnitte ermittelt.

Die gleichen Parameter wie im zweiten werden im dritten Schritt untersucht. Allerdings wird das Seil dazu, um es aus der direkten Anwendung zu lösen, in einem eigenen Prüfstand mit der Seilkraft entsprechend der Anwendung belastet. Nach dem Aufbringen einer Querkraft, die ebenso aus der Anwendung abgeleitet wird, werden die genannten Parameter gemessen, um die bleibende Deformation des Seils zu ermitteln. Im letzten Schritt wird der Querelastizitätsmodul der Seile gemessen, um das Verhalten des Seilquerschnitts unter der Belastung im Wickelpaket beurteilen zu können.

3.1 Untersuchte Seile und Trommeln

In Abb. 3.1 sind die Trommeln zu sehen, auf die die in Abb. 3.2 gezeigten Seile aufgewickelt werden. Die Benennung ist so gewählt, dass an der führenden Zahl zu erkennen ist, auf welche Trommel ein Seil vom Durchmesser her gehört. Seil 1.1 bis Seil 1.5 gehören zu Trommel 1 und Seil 2.1 bis Seil 2.3 zu Trommel 2.1 beziehungsweise Trommel 2.2. Angaben zu den Trommeln sind in Tab. 3.1 und zu den Seilen sind in Tab. 3.2 zu finden.

Weil alle untersuchten Faserseile Hochfestfaserseile sind, werden sie im folgenden lediglich als Faserseile bezeichnet.

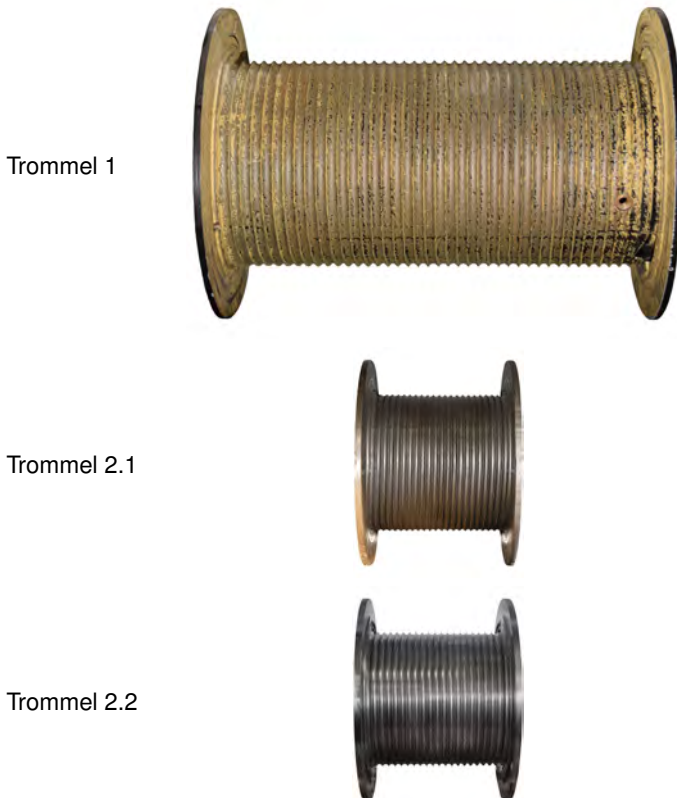


Abb. 3.1: Trommeln für experimentelle Untersuchungen

Seil 1.1



Seil 1.2



Seil 1.3



Seil 1.4



Seil 1.5



Seil 2.1



Seil 2.2



Seil 2.3



Abb. 3.2: Seile für experimentelle Untersuchungen

In den durchgeführten Experimenten wurden nicht alle Seile auf allen möglichen Trommeln untersucht. Prinzipiell mögliche Untersuchungen konnten aus verschiedenen Gründen nicht erfolgen. Beispielsweise konnte das Drahtseil 2.1 aufgrund zu starker Schwingungen beim Ablauf von der Trommel nicht auf seinen Querschnitt hin untersucht werden. Die Aufnahmen des Wickelpakets von Seil 2.2 lassen lediglich eine Auswertung der Wickelhöhen aber nicht den späteren Vergleich mit dem im Modell ermittelten Werten zu.

In Tab. 3.3 sind die durchgeführten Untersuchungen zusammengefasst. Die Experimente gliedern sich wie folgt.

Wickelversuch

Untersuchung Wickelpaket	Umwicklungsposition	P
Untersuchung Seilquerschnitt	irreversible Deformation	R_{rel}

Querdruckversuch

Untersuchung Seilquerschnitt	irreversible Deformation	R_{rel}
Untersuchung Querelastizitätsmodul	reversible Deformation	E_{SQ}

Tab. 3.3: Durchgeführte Experimente

Seil	Wickelversuch			Querdruckversuch	
	Trommel	P	R_{rel}	R_{rel}	E_{SQ}
1.1	1	✓	✓	✓	✓
1.2	1	✓	✓	✓	✓
1.3	1	✓	✓	✓	✓
1.4	1	✓	✓	✓	✓
1.5	1	✓	✓	✓	✓
2.1	2.1	✓	✗	✓	✓
2.2	2.2	(✓)	✓	✓	✓
2.3	2.2	✗	✗	✓	✓

3.2 Wickelversuche

Zur Untersuchung von mehrlagig bewickelten Seiltrommeln gibt es am Institut für Maschinenwesen (IMW) einen Wickelprüfstand (Abb. 3.3). Dieser ist so aufgebaut, dass das Seil auf der Speichertrommel mit einer geringen Seilkraft gespeichert wird. Die gewünschte Seilkraft wird mithilfe eines Spills durch die Umschlingungen aufgebracht. Das Seil wird anschließend über eine Seilscheibe zur Trommel geführt. Der Abstand zwischen Seilscheibe und Trommel dient dazu, einen definierten Ablenkwinkel des Seils zu erreichen (siehe auch Abb. 2.22).

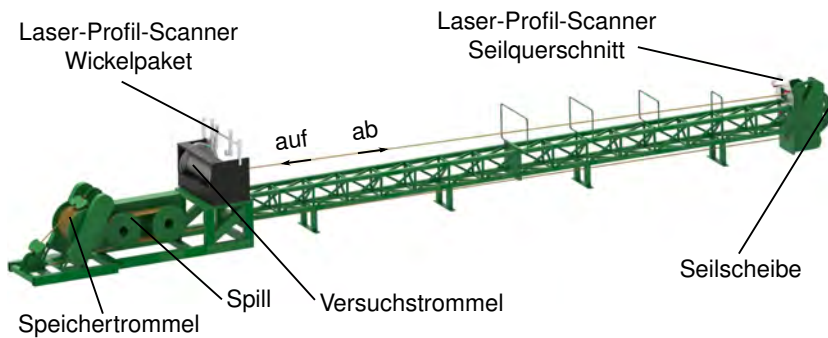


Abb. 3.3: Wickelprüfstand mit Angabe der einzelnen Komponenten

An der Trommel wird das Wickelpaket untersucht. Dazu sind bis zu drei LPS über der Trommel angeordnet (Abb. 3.4).

Zur Untersuchung der Seilquerschnitte werden drei LPS nahe der Seilscheibe angeordnet. Durch die Ausrichtung rund um das Seil ist es möglich, die gesamte Oberfläche eines Seilquerschnitts aufzunehmen (Abb. 3.5).

Wenn nicht anders angegeben, werden für die Experimente die Versuchsparameter nach Tab. 3.4 verwendet. Mit diesen werden fünf Wiederholungen durchgeführt.

Die Seilkraft ist so gewählt, dass es zu keinen plastischen Deformationen an der Trommel kommt. Damit sind vergleichbare Ausgangsbedingungen zwischen den Bewicklungen mit den verschiedenen Seilen gewährleistet.



Abb. 3.4: Laser-Profil-Scanner über Trommel zur Untersuchung des Wickelpaketes angeordnet

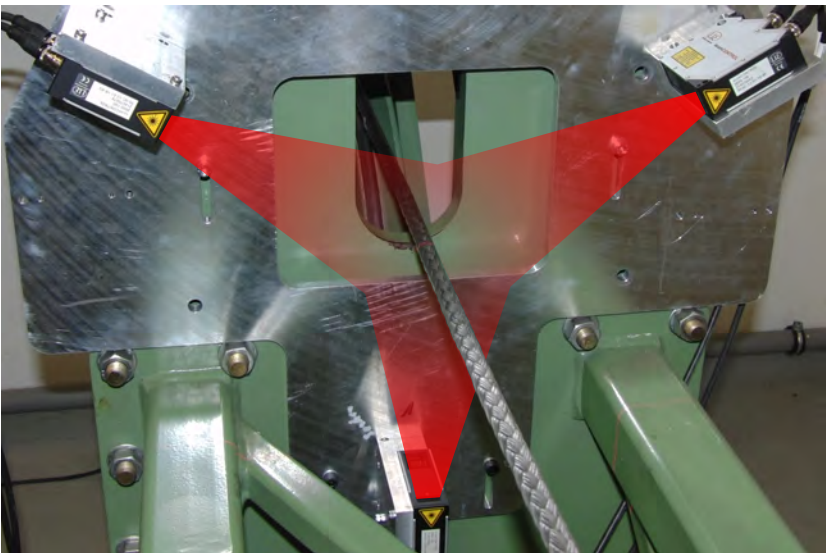


Abb. 3.5: Laser-Profil-Scanner um Seil zur Untersuchung des Seilquerschnitts angeordnet

Tab. 3.4: Parameter Wickelversuche

Trommel	Seilkraft F_L in kN	Seilgeschwindigkeit v_S in m / min	Ablenkwinkel δ_{\max} in °
1	50	25	2,37
2.1	25	15	0,79
2.2	25	15	0,79

3.2.1 Wickelpaket – Messung und Auswertung

Dieses Kapitel ist in zwei Abschnitte unterteilt. Im ersten werden der Aufbau und der Ablauf der Messung beschrieben. Im zweiten wird die Auswertung erläutert.

Aufbau und Ablauf der Messung des Wickelpaketes

Der Aufbau der LPS über der Trommel ist in Abb. 3.6 dargestellt.

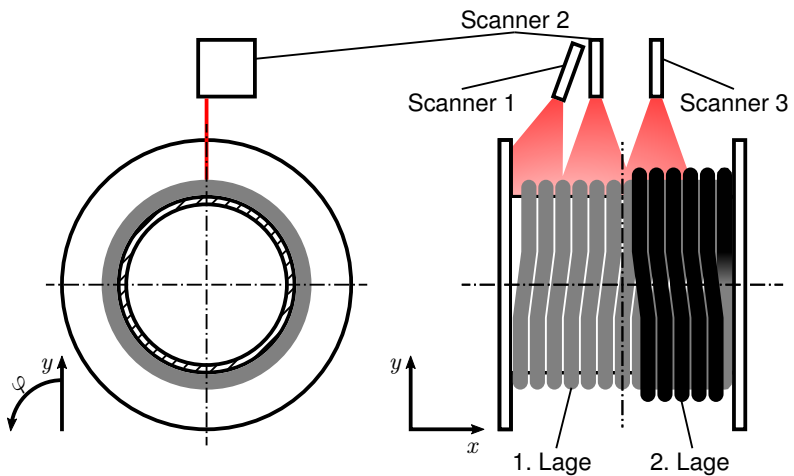


Abb. 3.6: Aufbau der Laser-Profil-Scanner über der Seiltrommel zur Aufnahme des Wickelpaketes (Ausrichtung von Scanner 1 zur Aufnahme des Aufstiegsbereichs an der Bordscheibe)

Die LPS können einzeln oder mehrfach nebeneinander eingesetzt werden. Mit ihrer Hilfe wird die Oberfläche der Trommel oder der Umwicklungen aufgenommen. Sie sind so ausgerichtet, dass die Aufnahmen aller Sensoren in derselben Ebene mit der Drehachse der Trommel liegen. Die Aufnahmen des Scanners sind somit orthogonal zur tangentialen Trommeloberfläche. In axialer Richtung können sie an verschiedenen Positionen zum Einsatz kommen. Durch eine Überlappung der Messbereiche von mehreren LPS kann der Untersuchungsbereich erweitert werden. Um den Aufstiegsbereich besser aufzunehmen, kann ein LPS so geneigt werden, dass die Aufnahme des Scanners

nicht parallel zur Drehachse der Trommel ausgerichtet ist (Scanner 1 Abb. 3.6). Bei gleichzeitiger Überschneidung ergibt sich so eine verbesserte Auflösung der Umwicklungen durch die verschiedenen Blickwinkel.

Die Aufnahmen werden in Abhängigkeit des Drehwinkels der Trommel getriggert. Dadurch ist es möglich, die Aufnahmen von verschiedenen Umdrehungen oder Lagen später positionsgetreu übereinanderzulegen. Die Experimente wurden mit einer Auflösung von 64 Bildern pro Umdrehung durchgeführt.

Die Anzahl an aufgenommenen Umwicklungen je LPS variieren in Abhängigkeit vom Seildurchmesser. Aufgrund der konstanten Scanbreite können von Seilen mit geringerem Querschnitt mehr Umwicklungen aufgenommen werden.

Wickelpaket Auswertung

Ziel der Auswertung ist die Ermittlung der Position der einzelnen Umwicklungen (Abb. 3.8 und Abb. 3.9), damit deren Verlauf beurteilt werden kann. Die Auswertung wird mithilfe der Software MATLAB durchgeführt.

Um die Ergebnisse verschiedener Seile und Trommeln vergleichen zu können, wird eine relative Darstellung gewählt. Aus dem Wickelradius (Höhe bezogen auf die Trommeldrehachse, Formeln (2.10), (2.19), (2.26) und (2.27)) wird die relative Wickelhöhe

$$P_{y,rel} = \frac{y - \frac{D}{2}}{d_n} \quad (3.1)$$

berechnet. Dadurch ist die Trommeloberfläche auf 0 gesetzt und die Höhe der ersten Lage liegt je nach Verhalten der Seilquerschnitte bei ungefähr 1. Die Höhe der folgenden Lagen entspräche bei Querschnitten mit Nenndurchmesser im KB der jeweiligen relativen Wickelhöhe. Im PB und durch Deformation kommt es zu Abweichungen.

Die axiale Position wird als relative Position

$$P_{x,rel} = \frac{x}{e} \quad (3.2)$$

angegeben. Die Breite der Rillung hat in den Darstellungen somit den Wert 1.

Da ein oder mehrere LPS in der Regel nicht die gesamte Trommellänge abdecken, wird die relative Position in Bezug auf den Scanner angegeben Abb. 3.7.

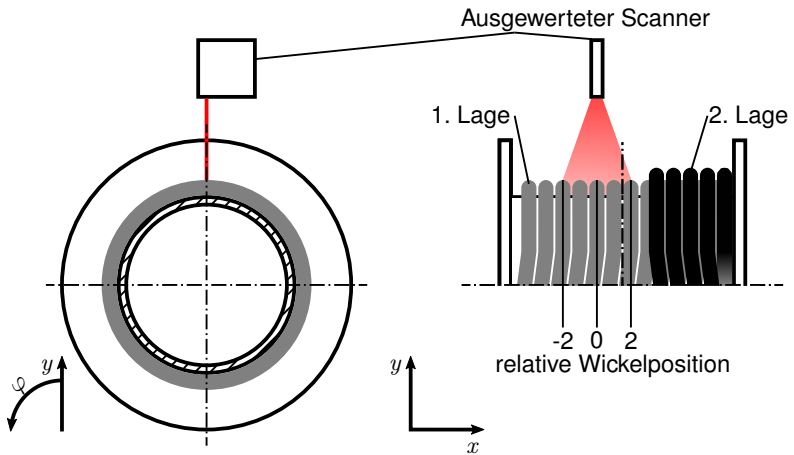


Abb. 3.7: Exemplarische Darstellung eines Laser-Profil-Scanners über der Trommel mit Angabe der auf ihn bezogenen relativen Wickelposition

Zur exemplarischen Darstellung des Vorgehens bei der Auswertung wird dieses anhand von Seil 1.3 als Beispiel für ein Faserseil und Seil 2.1 als Beispiel für ein Drahtseil beschrieben.

Das Rillungsverhältnis von

$$u_{e,d_n} = \frac{e_{\text{Trommel 1}}}{d_{n,\text{Seil 1.3}}} = 1,048 \text{ und}$$

$$u_{e,d_n} = \frac{e_{\text{Trommel 2.1}}}{d_{n,\text{Seil 2.1}}} = 1,05$$

ist in einer vergleichbaren Größenordnung. Der unterschiedliche Aufbau der

gezeigten Wickelpakete ist daher nicht auf unterschiedlicher Geometrieverhältnisse zurückzuführen.

Der Verlauf des Wickelvorgangs ist in Trommelumdrehungen angegeben. Ein Versuch umfasst das einmalige Bewickeln der Trommel. Die Anzahl der Trommelumdrehungen bis zur vollständigen Bewicklung der Trommel

$$d_T = u \cdot l \tag{3.3}$$

ergibt sich aus dem Produkt aus Umwicklungen je Lage und der Lagenanzahl.

In den folgenden Darstellungen bezieht sich die relative Position auf den Nullpunkt des LPS. Die Angabe erfolgt in diesem Fall nicht relativ zur Trommel.

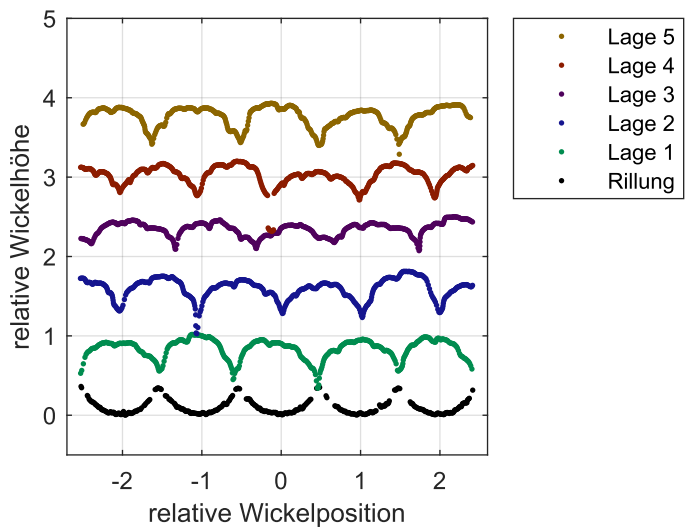


Abb. 3.8: LPS Aufnahmen eines Faserseilwickelpakets (Seil 1.3) im PB mit Rillung und den Lagen eins bis fünf

Die Ausrichtung der Messdaten wird auf Grundlage der Trommeloberfläche und dem bekannten Trommeldurchmesser D durchgeführt.

Beim Draht- und beim Faserseil ist die ungleichmäßige Oberfläche der Seile aufgrund ihres Aufbaus aus Litzen zu erkennen. Die Position der Umwick-

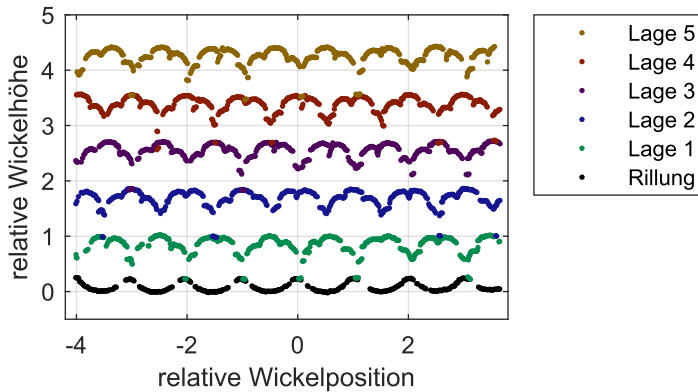


Abb. 3.9: LPS Aufnahmen eines Drahtseilwickelpakets (Seil 2.1) im PB mit Rillung und den Lagen eins bis fünf

lungen soll in Relation zur Trommel angegeben werden. Wie bereits in Kapitel 2.4.2 auf Abb. 2.25 wird als Kenngröße für den Wickelradius die Oberkante r_{Ok} der Lage k gewählt. Dies hat den Vorteil, dass dieser Punkt in der Auswertung des Experiments verhältnismäßig gut zu finden ist. Dies ist beim mittleren Wickelradius r_k aufgrund des unbekannten Seilquerschnitts nicht gegeben.

Um trotz der ungleichmäßigen Oberfläche eine Aussage über die Umwicklung als Gesamtes zu erhalten, wird eine Ausgleichsfunktion für jede Umwicklung berechnet. Nach einer groben Identifizierung der Umwicklungen werden aus den Punkten einer Umwicklung die relevanten ermittelt. Dies wird mithilfe der konvexen Hülle jeder Umwicklung vorgenommen. In Abb. 3.10 und Abb. 3.11 sind exemplarische Umwicklungen der fünften Lagen aus Abb. 3.8 und Abb. 3.9 mit Ausgleichsfunktion, den Maximalpunkten und der relativen Umwicklungsposition $P_{\text{rel},i,j}$ zu sehen. Es ist jeweils ein Ausschnitt gewählt, um den Unterschied zwischen Maximalpunkt und der Umwicklungsposition zu verdeutlichen.

In Abb. 3.10 ist zu sehen, dass es eine Abweichung des Maximalpunktes von der Umwicklungsposition gibt. Die Maximalpunkte sind von der ungleichmäßigen Oberfläche und dem Verkippen der Umwicklung bei $P_{x,\text{rel}} = 2$ gekennzeichnet. Die Ausgleichsfunktion glättet die Oberfläche. Sie gibt aber nicht die Mitte der verkippten Umwicklung wieder. Dies ist auch nicht beabsichtigt, da die Lage der Umwicklung nicht optimal ist und so auch erfasst werden soll.

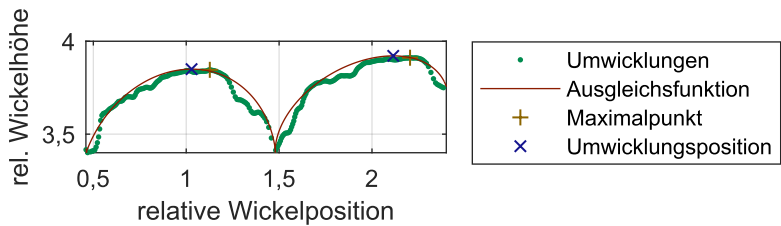


Abb. 3.10: LPS Aufnahme der fünften Faserseillage (Seil 1.3) aus Abb. 3.8 mit Angabe der Maximalpunkte und der ausgewerteten Umwicklungsposition

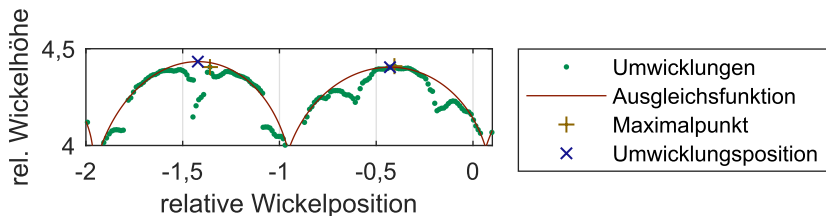


Abb. 3.11: LPS Aufnahme der fünften Drahtseillage (Seil 2.1) aus Abb. 3.9 mit Angabe der Maximalpunkte und der ausgewerteten Umwicklungsposition

In Abb. 3.11 ist der Ausgleich bezüglich eines Litzentials erkennbar. Die Position der Umwicklung bei $P_{x,rel} = -1,5$ wird deutlich korrigiert. Im Gegensatz dazu gibt es bei der anderen Umwicklung annähernd eine Übereinstimmung der beiden Werte.

Diese Auswertung wird für jede Umwicklung in allen Aufnahmen ausgeführt. Anschließend werden die Punkte zu Lagen und Umwicklungen zusammengefasst. Eine Umwicklung einer Lage erscheint solange im Aufnahmebereich eines LPS, bis eine folgende Lage diese überdeckt.

3.2.2 Wickelpaket – Ergebnisse

Die qualitative Bewertung von Wickelpaketen wird exemplarisch für ein Faser- und ein Drahtseil beschrieben. Der Verlauf der Umwicklungen vollzieht sich entsprechend der System-Rillung wie in Abb. 2.20 dargestellt. Im Vergleich zu der dortigen Abbildung von lediglich einer Trommelumdrehung sind in der Darstellung der experimentellen Daten viele Wiederholungen zu sehen. Eine Umwicklung ist in den Abb. 3.12 bis 3.16 zusammenhängend jeweils in einer Farbe dargestellt. Die Darstellungen enthalten die Trommeloberfläche und fünf Lagen Umwicklungen. Die Versuche beginnen jeweils mit leerer Trommel. Eine Umwicklung ist so lange sichtbar, bis die Umwicklung an derselben axialen Position der folgenden Lage sie überdeckt. Dadurch sind die Umwicklungen mehrere Umdrehungen sichtbar, und deswegen ist die Abbildung im Wickelverlauf (φ -Achse) gestaucht. Der PB zeigt sich durch eine dichte Ansammlung von Messpunkten. Der KB erscheint durch die zusätzliche Bewegung in x -Richtung weniger dicht besetzt.

Zur Darstellung wird Seil 1.3 als offenes Faserseil gewählt, da das Seil relativ gut zur Trommel passt und dennoch ein für Faserseile charakteristisches Verhalten erkennbar ist. Als Drahtseil wird Seil 2.1 gezeigt. In Abb. 3.12 ist ein Ausschnitt der Trommellänge L (relative Wickelposition P_{rel}) mit Umwicklungen über eine vollständige Bewicklung der Trommel dargestellt.

Abb. 3.13 zeigt den Verlauf der relativen Wickelhöhe über der relativen Wickelposition. Die Trommeloberfläche liegt im Mittel bei einer relativen Höhe von 0. Aufgrund der nicht exakt runden Form der Trommel lassen sich Abweichungen in Form einer Häufung von Messpunkten in den PB erkennen.

Die Höhe der ersten Lage liegt bei beiden Seilen erwartungsgemäß ungefähr beim Nenndurchmesser des Seils d_n . Das Faserseil zeigt jedoch bereits in dieser Lage einen weniger gleichmäßigen Verlauf. Das Drahtseil baut im Gegensatz dazu ein gut geordnetes Wickelpaket auf. Es ist erkennbar, dass die Häufung der Messpunkte im PB stets gut übereinanderliegen. Die Veränderung der Wickelhöhe dazwischen ist durch das Überlaufen der Umwicklung über die darunterliegende begründet. Der Aufbau im PB ist somit durch eine gute pyramidenförmige Stapellage gekennzeichnet. Das Faserseil hat in der zweiten Lage einen erkennbaren PB. Es liegt eine Häufung von Messpunkten mit einer geringeren Höhe vor. In der dritten Lage ist der PB nicht mehr erkennbar. Für

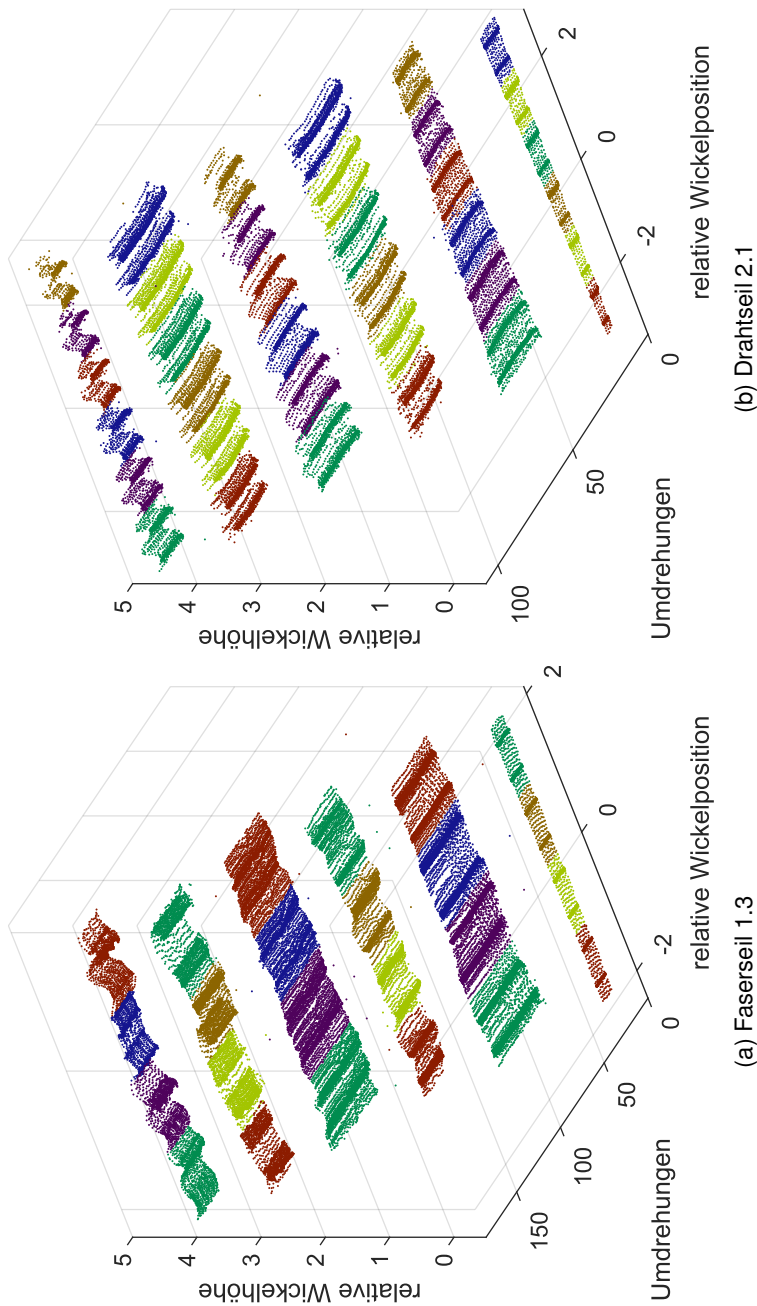


Abb. 3.12: Dreidimensionaler Verlauf der Umwicklungen (Umwicklungspositionen vgl. Abb. 3.10)

die folgenden Lagen lässt sich wieder ein Unterschied zwischen den Bereichen erkennen.

Der Verlauf der Wickelhöhe ist in Abb. 3.14 zu sehen. Hier ist der Verlauf über alle Lagen des gesamten Wickelvorgangs dargestellt. Neben der insgesamt geringeren Wickelhöhe ist für das Faserseil auch die geringere Höhendifferenz innerhalb der Lagen erkennbar.

Der Unterschied in der Wickelcharakteristik wird in Abb. 3.15 noch deutlicher. Das Drahtseil zeigt in der ersten Lage nur geringfügige Schwankungen der relativen Wickelhöhe. In der zweiten Lage ist gut der Unterschied zwischen PB und KB erkennbar. Das Seil verläuft zumeist im PB und läuft in den KB kurz über.

Das Faserseil hat demgegenüber eine größere Schwankung in der Höhe in der ersten Lage. In der zweiten zeigt sich sowohl ein Ausschlag nach oben wie auch einer nach unten.

Die Ordnung der Wicklung lässt sich abschließend anhand des Wickelverlaufs in axialer Richtung beurteilen (Abb. 3.16). Das Drahtseil liegt wie von der System-Rillung vorgegeben zumeist im PB. Die PB der verschiedenen Lagen liegen gut auf einer Linie in axialer Richtung. Für das Faserseil ist im Gegensatz dazu erkennbar, dass es bereits in der ersten Lage eine Abweichung zwischen Rillung und Wicklung bei ungefähr $P_{\text{rel}} = -1,5$ und ungefähr $P_{\text{rel}} = 0$ gibt. Dies kann durch einen zu großen Seildurchmesser d_{max} (vgl. Gleichung (3.11)) in axialer Richtung oder ein verkippen der Umwicklung (vgl. Abb. 3.10) begründet sein. In Lage drei ist gar kein ausgeprägter PB und KB erkennbar. In den folgenden Lagen ist der PB wieder erkennbar. Dieser ist jedoch deutlich breiter im Vergleich zu den ersten beiden Lagen ausgeprägt.

Zur quantitativen Bewertung des Wickelverlaufs können die Wickelhöhen der Lagen im PB und KB betrachtet werden. Entsprechend der unterschiedlichen Anordnung der Seile in den Bereichen ergeben sich die unterschiedlichen Wickelhöhen (vgl. Abb. 2.20). Der theoretisch zu erwartende Unterschied zwischen den Bereichen ist am deutlichsten in den Abb. 3.13 und 3.15 für das Drahtseil (Seil 2.1) zu erkennen.

Um die Höhenunterschiede zu bewerten, werden immer halbe Umwicklungen als eine Einheit betrachtet. Diese umfasst idealerweise einen PB und die Hälfte

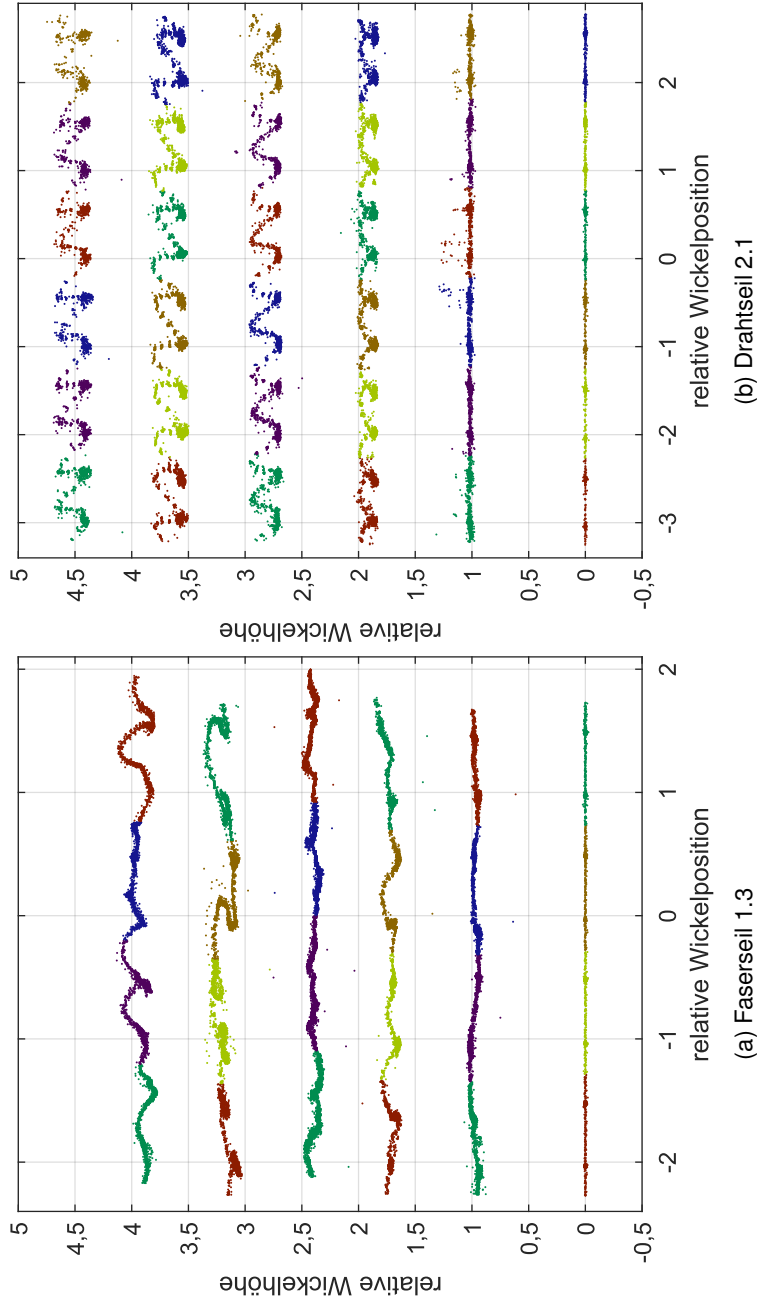
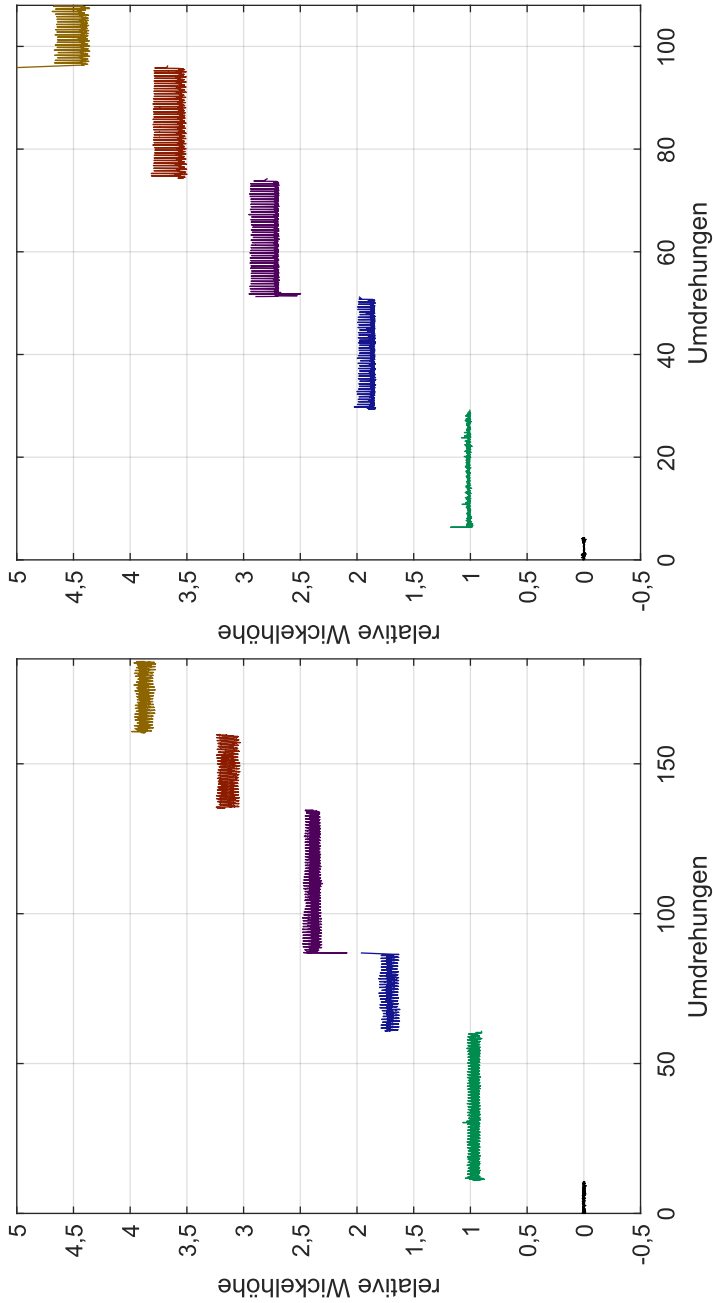


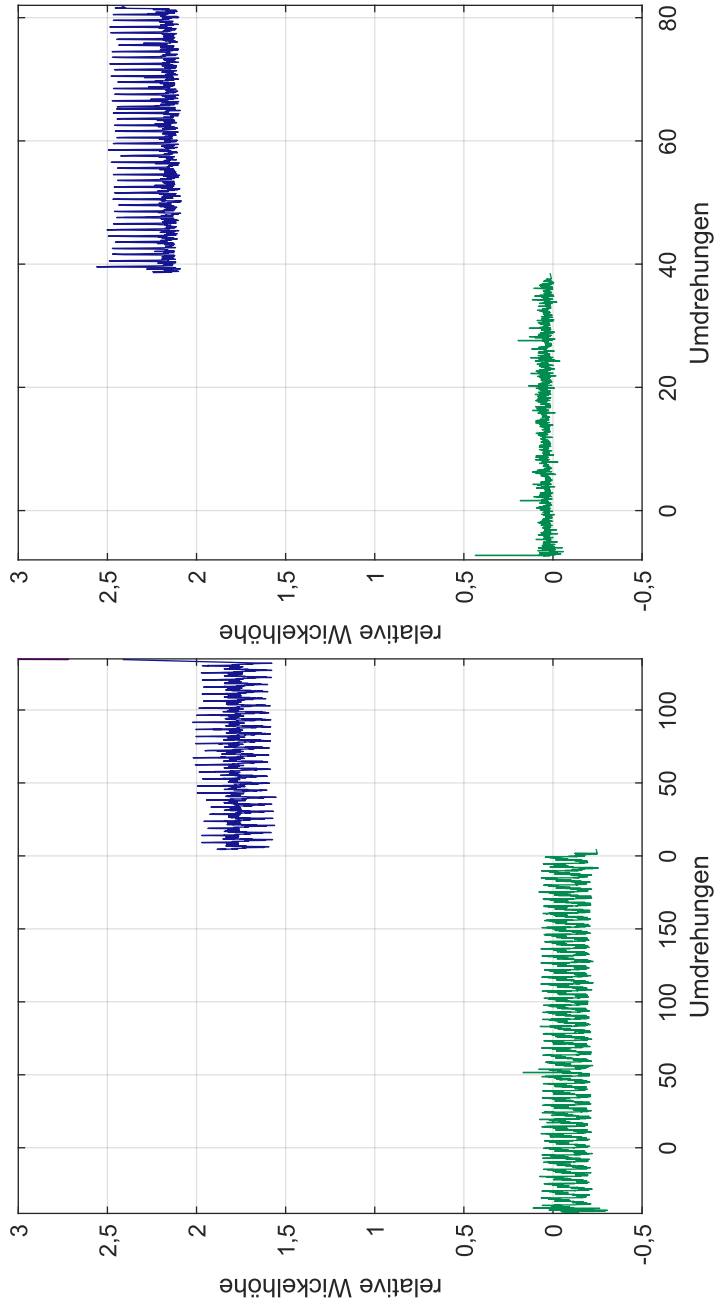
Abb. 3.13: Wickelverlauf in der xy -Ebene (Umwicklungspositionen vgl. Abb. 3.10)



(b) Drahtseil 2.1

(a) Faserseil 1.3

Abb. 3.14: Wickelverlauf in der $y\varphi$ -Ebene (Umwicklungspositionen vgl. Abb. 3.10)



(a) Faserseil 1.3 (b) Drahtseil 2.1

Abb. 3.15: Wickelverlauf in der $y\varphi$ -Ebene der ersten und zweiten Lage

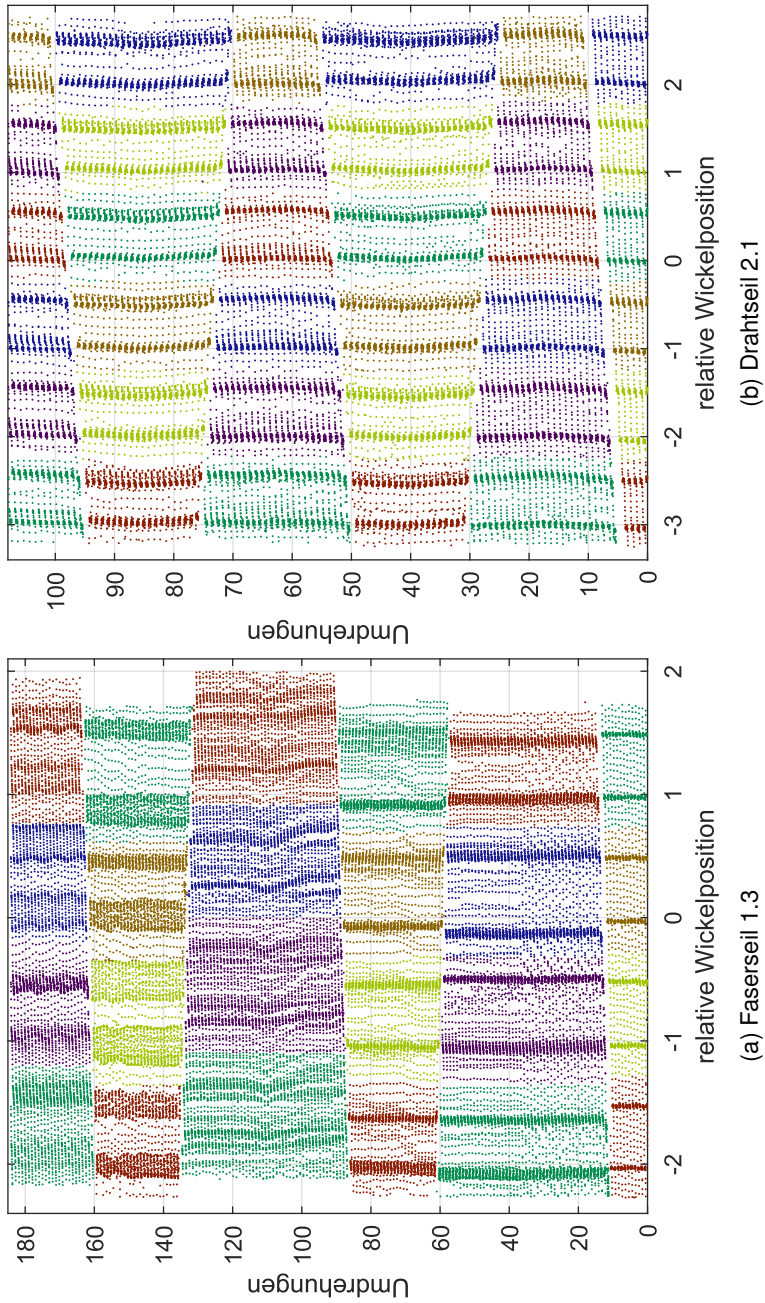


Abb. 3.16: Wickelverlauf in der $x\varphi$ -Ebene (Umdrehungspositionen vgl. Abb. 3.10)

des vorherigen und die Hälfte des anschließenden KB. Diese Aufteilung wurde gewählt, da sich für eine Umwicklung auf den beiden Hälften des Trommelumfangs zum Teil erhebliche Unterschiede im Wickelverhalten zeigen. Für jede halbe Umwicklung wird das Maximum und das Minimum gesucht. Dieser begrenzte Bereich ist in Abb. 3.17 durch schwarze Kästen gekennzeichnet.

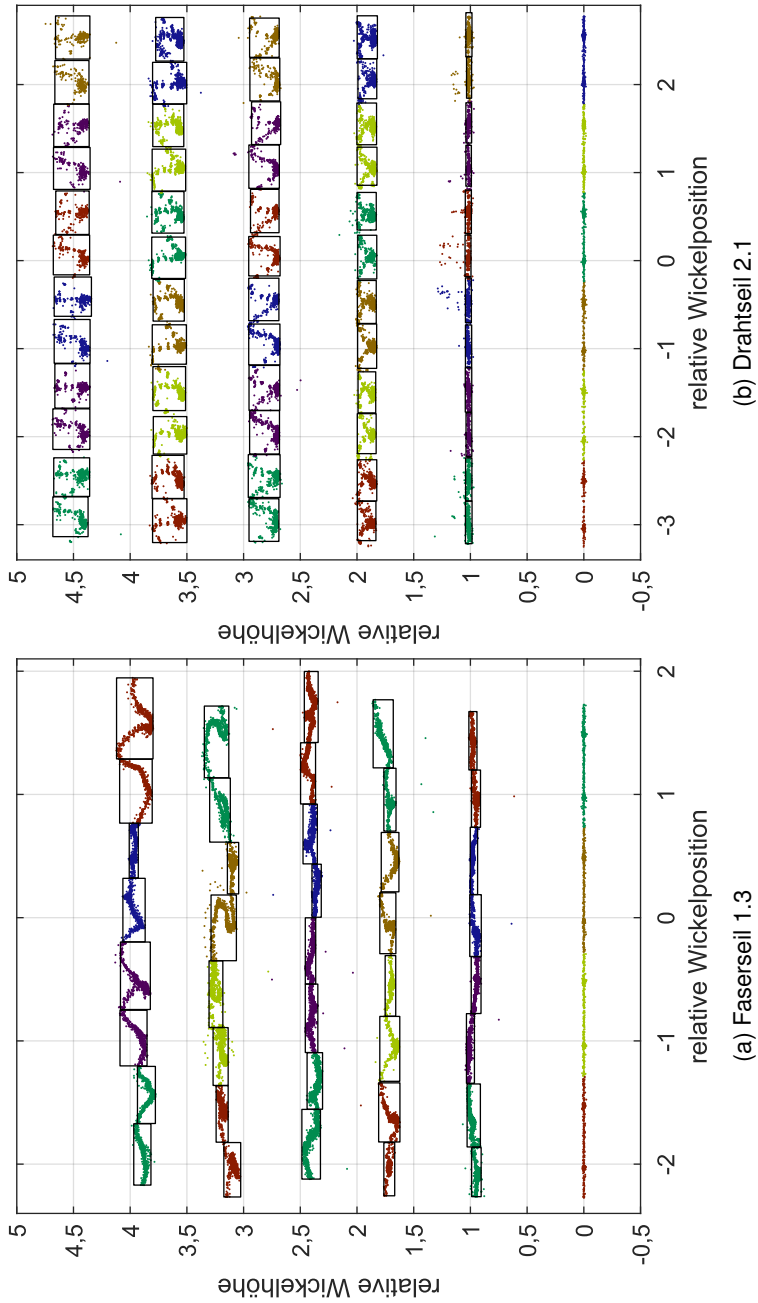
Im Vergleich der Seile 1.3 und 2.1 zeigen sich deutliche Unterschiede. Das Drahtseil weist für den Höhenunterschied zwischen den Bereichen (PB und KB) und auch für die Höhe für alle Umwicklungen innerhalb einer Lage jeweils ähnliche Werte auf. Das Faserseil hat demgegenüber sowohl deutliche Unterschiede in der Höhendifferenz zwischen den Bereichen als auch in der Höhe der gesamten Umwicklungen in einer Lage.

Dieses Ergebnis kann auch mithilfe eines Boxplots dargestellt werden. Damit werden mehrere Experimente in einer Abbildung verglichen. Für jedes Experiment wird jeder Bereich jeder Lage gezeigt. Durch die Darstellung als Boxplot können Unterschiede innerhalb eines Bereichs einer Lage erkannt werden. Die Abbildung mehrerer Experimente ermöglicht das Erkennen von Veränderungen zwischen den Experimenten. Damit kann ein sich Setzen des Wickelpaketes im Laufe der Experimente erkannt werden (Abb. 3.18).

Die Seile 1.3 und 2.1 zeigen kein Setzen. Das Drahtseil hat einen gleichmäßigen Verlauf in allen durchgeführten Wickelvorgängen. Seil 1.3 hat einen wesentlich ungleichmäßigeren Wickelverlauf, der sich durch eine größere Streuung der Wickelhöhen im PB und KB erkennen lässt. Zudem zeigt Seil 1.3 auch ein kompakteres Wickelpaket. Bei gleicher Lagenzahl ist das Wickelpaket in der letzten Lage deutlich niedriger.

Entgegen der theoretisch erwarteten einheitlichen Wickelhöhe in der ersten Lage zeigen alle Seile auch in dieser Lage unterschiedliche Wickelhöhen. Eine mögliche Erklärung für dieses Phänomen kann in der Steigung der Rillung im KB gesehen werden. Durch die damit verbundene axiale Kraftkomponente wird das Seil in diesem Bereich gegen die Rillenflanke gedrückt und dadurch gehoben. Bei sich stärker deformierenden Faserseilen kann zudem noch ein Kippen des Seilquerschnitts dazukommen (vgl. Abb. 3.10).

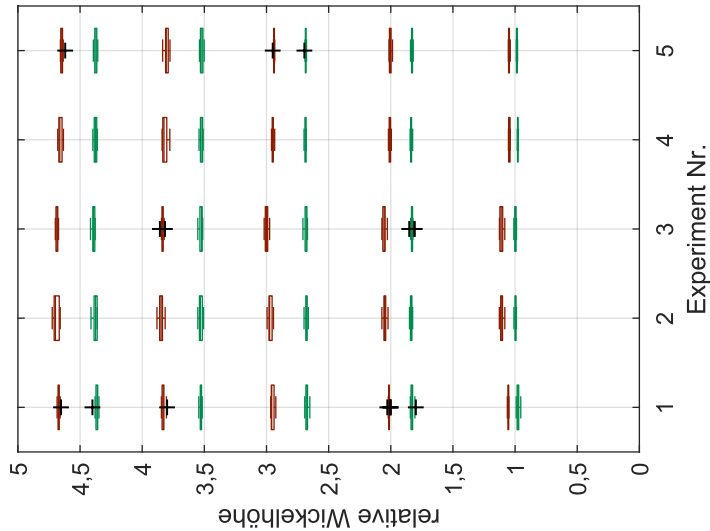
In Abb. 3.19 sind die Seile 1.1 und 1.2 zu sehen. Sowohl von der relativen Wickelhöhe als auch von der Streuung der Wickelhöhe im jeweiligen Bereich ist das Seil 1.1 dem Drahtseil ähnlich. Es hat eine hohe relative Wickelhöhe



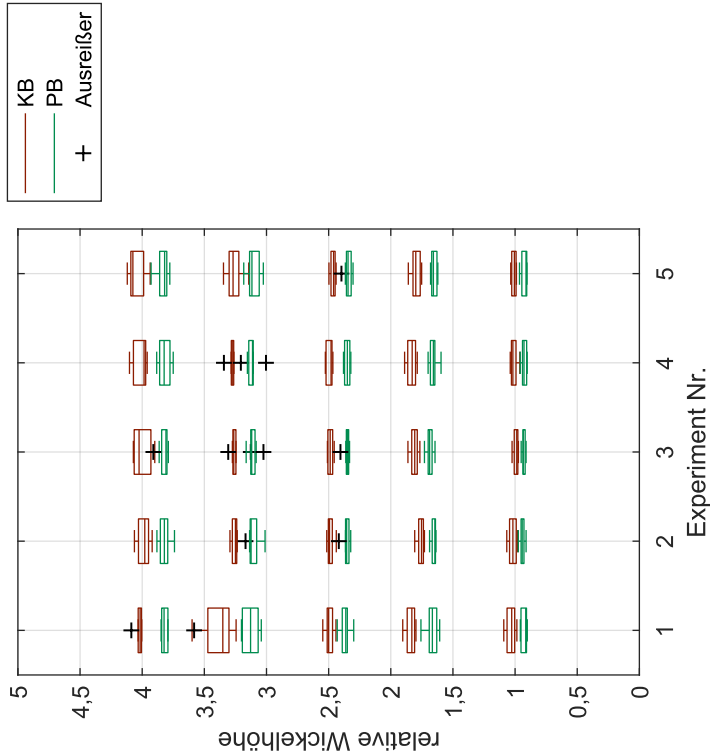
(a) Faserseil 1.3

(b) Drahtseil 2.1

Abb. 3.17: Wickelhöhe einzelner Umwicklungen und Lagen in der xy -Ebene



(a) Faserseil 1.3



(b) Drahtseil 2.1

Abb. 3.18: Boxplot der Wickelhöhe im Parallelbereich und Kreuzungsbereich

und eine geringe Streuung in den Bereichen. Es ist ein leichtes Setzen des Wickelpaketes über die durchgeführten Experimente erkennbar.

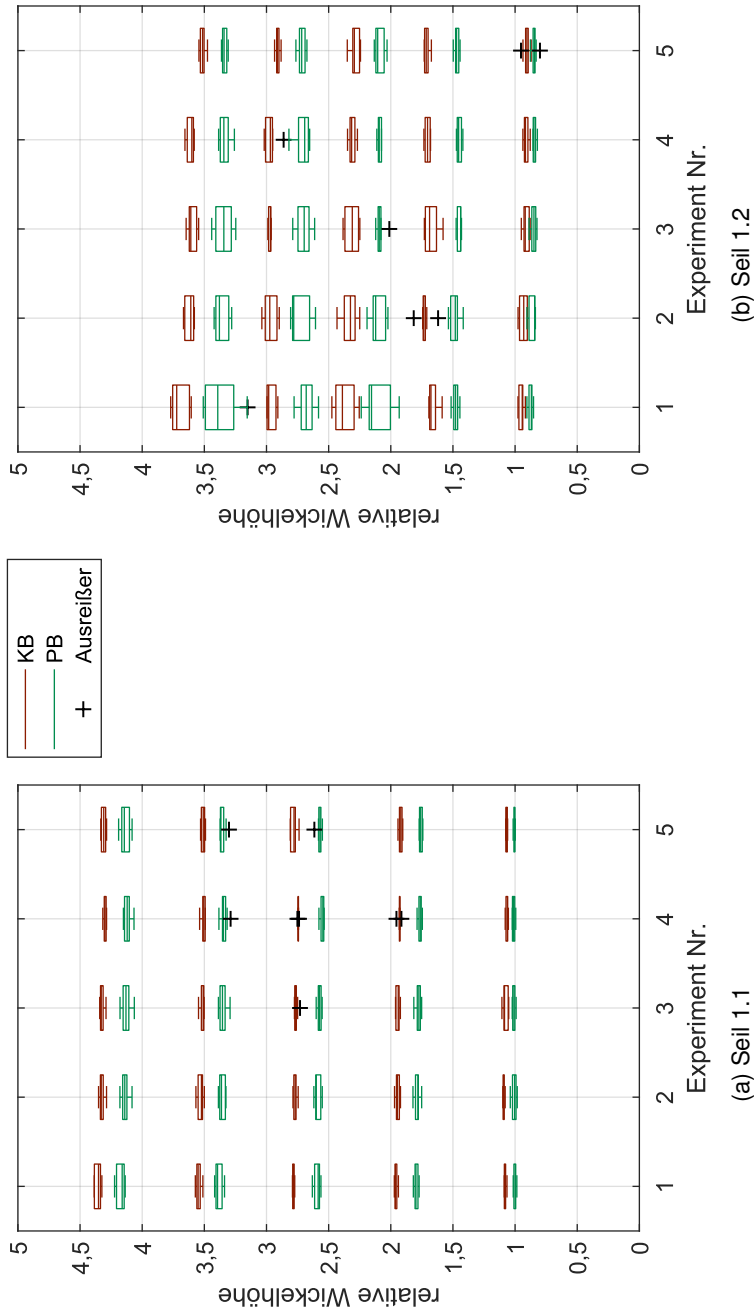
Seil 1.2 hat im Gegensatz dazu eine geringe Wickelhöhe und eine hohe Streuung. Bei diesem Seil ist zudem eine geringe Wickelhöhe in radialer Richtung erkennbar (d_{\min} vgl. Gleichung (3.12)). Die relative Wickelhöhe liegt bereits in der ersten Lage deutlich unter 1. Im Verlauf der Experimente zeigt das Seil ein Setzen der Wickelhöhen.

Die relative Wickelhöhe von Seil 1.4 ist vergleichbar mit dem Verhalten von Seil 1.3 (Abb. 3.20). Der Verlauf von Wickelhöhe und Streuung ist ähnlich. Abweichend ist jedoch ein Setzen für Seil 1.4 erkennbar.

Der Verlauf der Wickelhöhe von Seil 1.5 ist vor allem durch ein hohes Wickelpaket gekennzeichnet. Dabei ist zu erkennen, dass bereits in der ersten Lage die relative Wickelhöhe deutlich über dem Werte 1 liegt. In den letzten beiden dargestellten Experimenten weist das Seil eine geringe Streuung auf.

Einzelne Experimente zeigen Auffälligkeiten durch eine große Streuung innerhalb der Bereiche. Besonders deutlich ist dies bei Seil 1.5 in Experiment zwei erkennbar. Es gibt Überschneidungen zwischen den Lagen. Diese Überschneidungen kennzeichnen ein Einschneiden des Seils von höheren in niedrigere Lagen.

Dieses Phänomen ist zusätzlich in Abb. 3.21 für die Seile 1.3 und 1.5 dargestellt. Bei Seil 1.3 schneidet die fünfte in die vierte Lage ungefähr bei der relativen Wickelposition $P_{x,\text{rel}} = 1$ ein. Da dies nur im Bereich einer halben Umdrehung der Trommel stattfindet, erscheint die fünfte Lage dennoch durchgängig. Anders verhält sich das Wickelpaket von Seil 1.5. Der Aufbau des Wickelpaketes ist bereits in der zweiten Lage ungeordnet. Daraus resultierend können sich auch die folgenden Lagen nicht ordnungsgemäß aufbauen. Abschließend ergibt sich dadurch eine deutliche Lücke in der fünften Lage.



(a) Seil 1.1

(b) Seil 1.2

Abb. 3.19: Boxplot der Wickelhöhe im Parallelbereich und Kreuzungsbereich

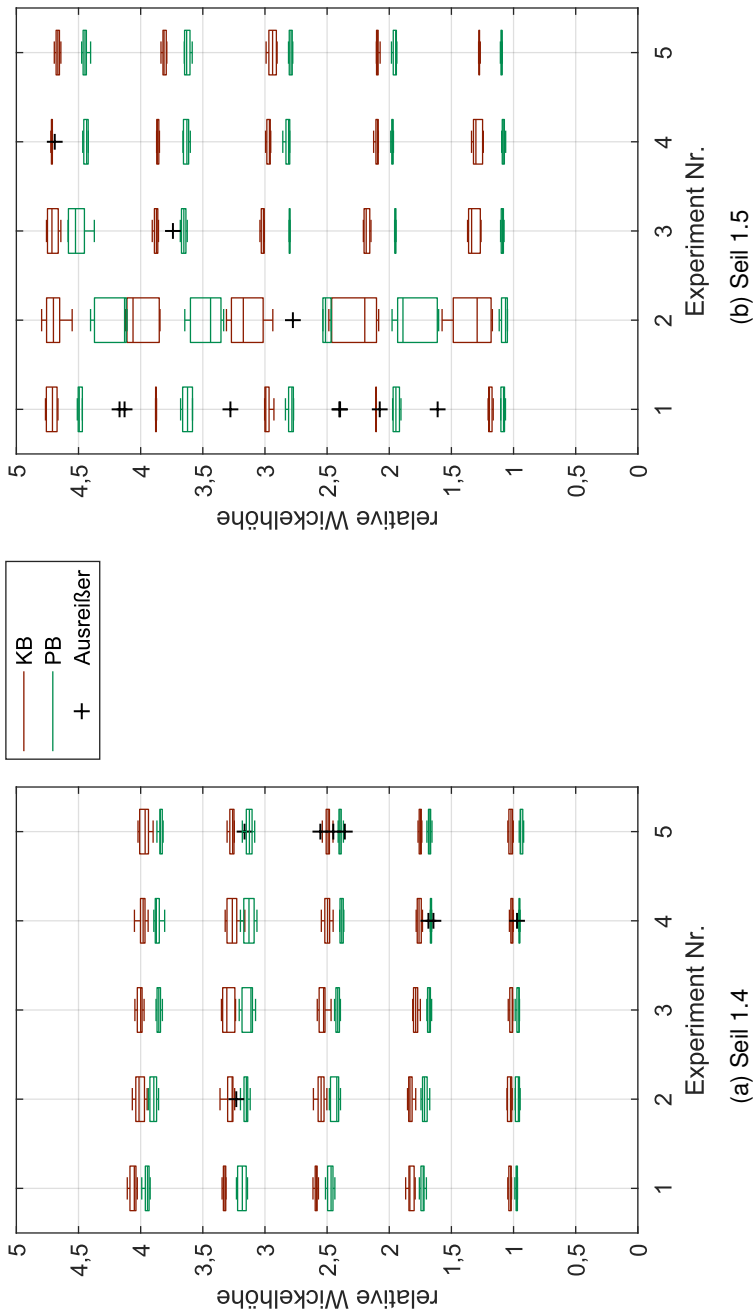


Abb. 3.20: Boxplot der Wickelhöhe im Parallelbereich und Kreuzungsbereich

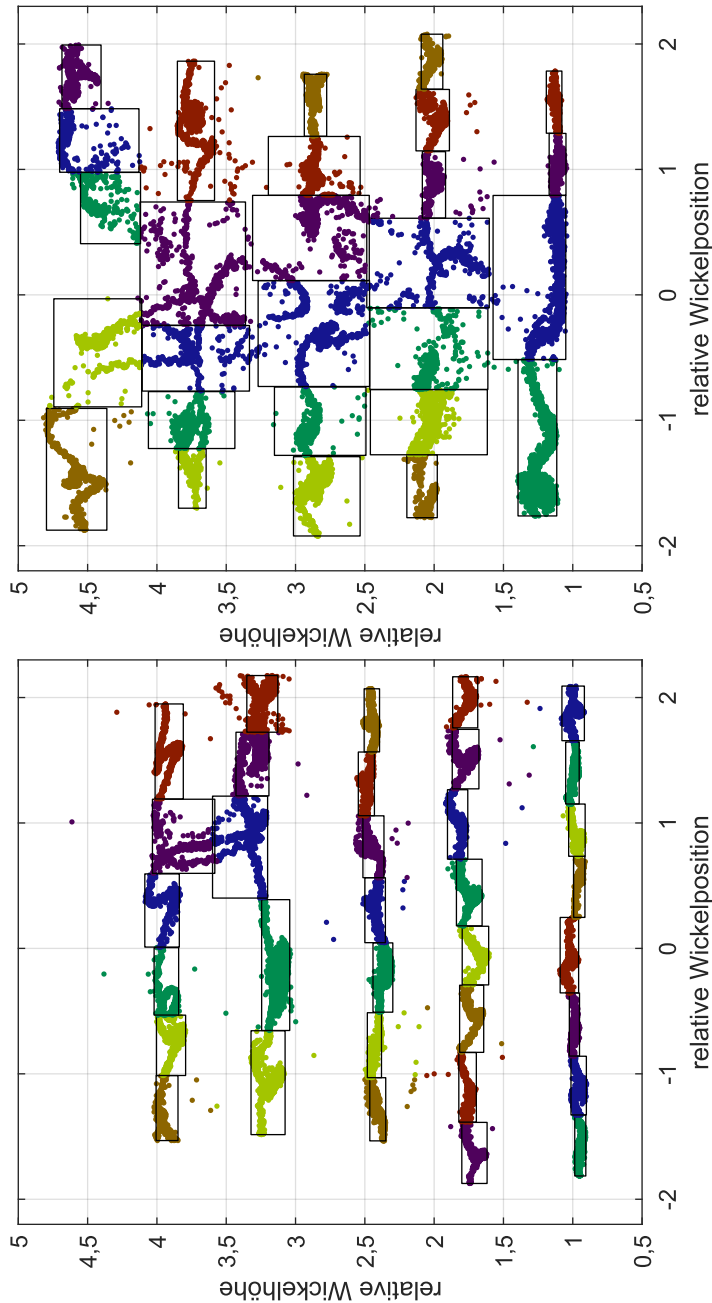


Abb. 3.21: Wickelverlauf mit eingeschnittenem Faserseil in der $x\varphi$ -Ebene

3.2.3 Seilquerschnitt – Messung und Auswertung

Dieses Kapitel ist in zwei Abschnitte unterteilt. Der erste enthält die Beschreibung des Aufbaus und des Ablaufs der Untersuchung. Der zweite das Vorgehen bei der Auswertung der Seilquerschnitte.

Aufbau und Ablauf der Messung der Seilquerschnitte

Der Aufbau der Laser-Profil-Scanner um das Seil ist in Abb. 3.22 dargestellt.

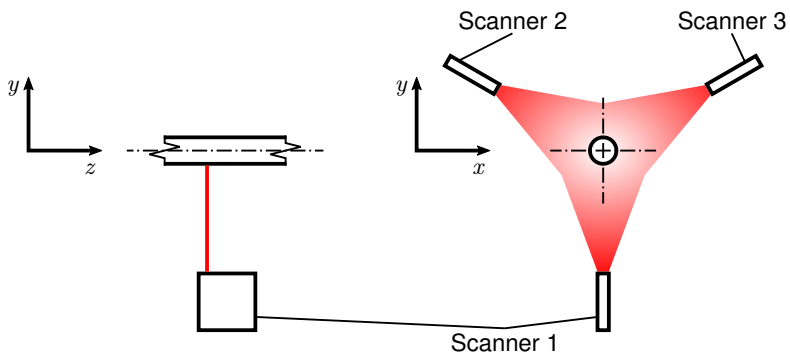


Abb. 3.22: Aufbau der Laser-Profil-Scanner um das Seil zur Aufnahme des Seilquerschnitts

Um den Querschnitt eines Seils untersuchen zu können, wird ein Aufbau mit drei LPS rund um das Seil verwendet. Die Scanner sind mit einem Winkel von je 120° zueinander angeordnet. Die Position zur Untersuchung des Seilquerschnitts ist im Wickelversuch nahe der Seilscheibe gewählt, um die Seilbewegung in radialer Seilrichtung (x - und y -Richtung) so gering wie möglich zu halten (vgl. Abb. 3.3 und 3.5). Bei der Messposition im Querdruckversuch gibt es keine Einschränkungen, da das Seil bei der Untersuchung statisch ist.

Die Daten aller Sensoren werden zur Auswertung zu einem Querschnitt übereinandergelegt. Durch dieses Verfahren liegen Informationen über die komplette Oberfläche des Querschnitts vor.

Die Aufnahmen werden in Abhängigkeit des Drehwinkels der Trommel getrig-

gert. Aufgrund des Seilverlaufs können die Aufnahmen den verschiedenen Lagen zugeordnet werden. Eine genauere Auflösung, die Zuordnung zu Parallel- und Kreuzungsbereich, ist mit dem verwendeten System nicht möglich. Die Experimente an der Trommel wurden mit einer Auflösung von 64 Bildern pro Umdrehung durchgeführt.

Die Untersuchung der Seilquerschnitte wird ohne eine Belastung des Seils in radialer Seilrichtung durchgeführt. Alle ermittelten Werte geben damit den Zustand der irreversiblen Deformation des Querschnitts wieder.

Auswertung Seilquerschnitt

Bei der Auswertung werden aus den einzelnen Aufnahmen der LPS komplette Seilquerschnitte zusammengestellt und diese anschließend bewertet. Die Auswertung wird mit der Software MATLAB durchgeführt.

Aus den aufgenommenen Punkten der drei LPS lässt sich durch Koordinatentransformation entsprechend der bekannten relativen Position der Scanner der Querschnitt des Seils berechnen. Dieser Gesamtquerschnitt wird durch die Menge der Punkte aller LPS dargestellt. In Abb. 3.23 sind die Scanbereiche der drei LPS mit einem aufgenommenen Seilquerschnitt zu sehen.

Der Querschnitt des Faserseils ist im Detail in Abb. 3.23 dargestellt.

Ein Seilquerschnitt weist in der Regel keine Kreisform auf. Deswegen ergeben sich in Abhängigkeit der Winkelposition, in der gemessen wird, unterschiedliche Durchmesser (vgl. Kapitel 2.2.3 und Abb. 2.11). Aufgrund des geschlagenen oder geflochtenen Aufbaus des Seils können auch in Abhängigkeit der axialen Position des Seils Unterschiede in der Form auftreten. Bei einem geschlagenen Seil bedeutet das, dass die Abweichung von der Kreisform dem Verlauf der äußeren Litzen folgt. Um diesen Effekt auszugleichen, besteht die Möglichkeit, mehrere Querschnitte vor der Auswertung übereinanderzulegen (Abb. 3.25). Dieses Vorgehen bei der Auswertung entspricht der richtigen Ermittlung von Seildurchmessern. In den durchgeführten Auswertungen wird keine Mehrfachauswertung durchgeführt, da mit dem vorhandenen Messaufbau keine ausreichende Koaxialität der Aufnahmen gewährleistet werden kann.

Der Effekt der unterschiedlichen Durchmesser je nach Winkelposition ist be-

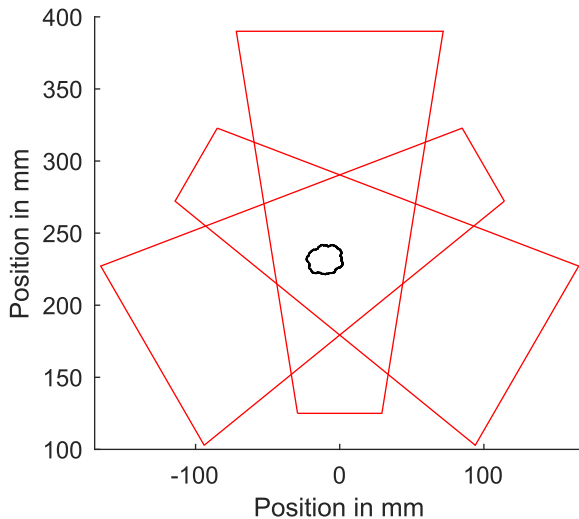


Abb. 3.23: Laser-Profil-Scanner Aufnahme mit Angabe des Messbereichs der Scanner und Faserseilquerschnitt (Seil 1.3)

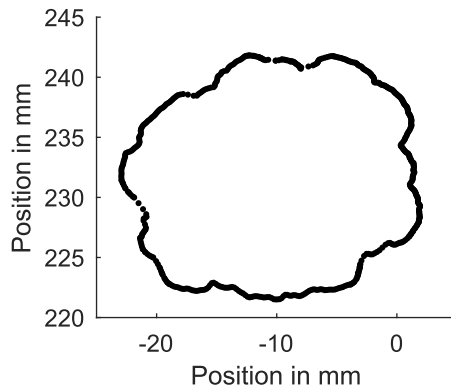


Abb. 3.24: Laser-Profil-Scanner Aufnahme Faserseilquerschnitt (Seil 1.3)

sonders für Seile mit wenigen und sich wenig deformierenden Litzen relevant. Ein Beispiel dafür ist ein sechslitziges Drahtseil (Seil 2.1).

Die unterschiedlichen Durchmesser des Seilquerschnitts in Abhängigkeit der Winkelposition können nach dem Messschieberprinzip ermittelt werden. Dazu

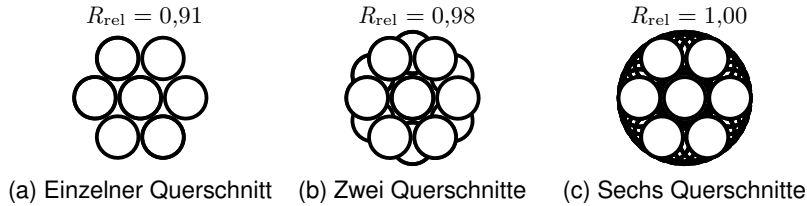


Abb. 3.25: Veränderung der relativen Rundheit bei einem sechslitzigen runden Seil in Abhängigkeit der ausgewerteten Seilquerschnitte

werden zwei parallele Tangenten an den Seilquerschnitt angelegt und deren Abstand ermittelt. Um mehrere Durchmesser zu ermitteln, werden die parallelen Tangenten im Bereich 0° bis 180° gedreht. Dieses Vorgehen entspricht der Ermittlung des Feret-Durchmessers in der Vermessung von Partikeln [PG07]. Zur Auswertung der vorliegenden Experimente wurden die Durchmesser in Schritten von 0,5° ausgewertet. Das Ergebnis ist eine Menge von Seildurchmessern (d_M) die den entsprechenden Querschnitt beschreiben (Abb. 3.26).

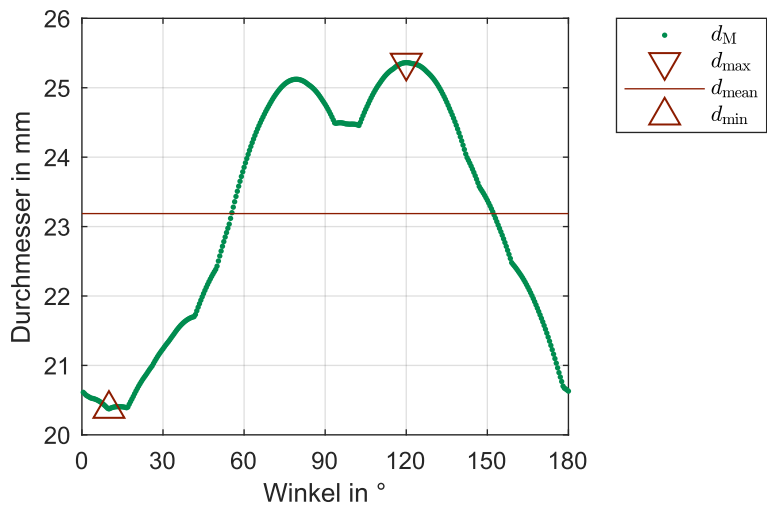


Abb. 3.26: Ausgewertete Seildurchmesser in Abhängigkeit der Winkelposition zu Abb. 3.24 mit Angabe von d_{\max} , d_{mean} und d_{\min}

Aus den gemessenen Durchmessern können anschließend als relevante Ver-

gleichsgrößen der größte Durchmesser d_{\max} und der kleinste Durchmesser d_{\min} ausgewählt werden. Außerdem kann der mittlere Durchmesser d_{mean} berechnet werden.

Weitere Kenngrößen eines Seilquerschnitts werden anhand des Umfangs oder der Fläche ermittelt. Als Fläche kann neben der Fläche des realen Querschnitts (Abb. 3.27a) die Fläche genutzt werden, die von den aufgenommenen Punkten eingeschlossen wird (Abb. 3.27b). Außerdem kann die Fläche ausgewertet werden, die von den Punkten der konvexen Hülle eingeschlossen wird (Abb. 3.27c). Zur Ermittlung des Umfangs können ebenfalls alle Punkte (Abb. 3.27d) oder die Punkte der konvexen Hülle (Abb. 3.27e) ausgewertet werden. Wie in Abb. 3.27 werden in Tab. 3.5 Größen, die sich auf alle Punkte beziehen, mit dem Subskript $_{\text{LPS}}$ gekennzeichnet. Größen, die von den Punkten der konvexen Hülle abgeleitet sind, werden mit dem Subskript $_{\text{kH}}$ bezeichnet.

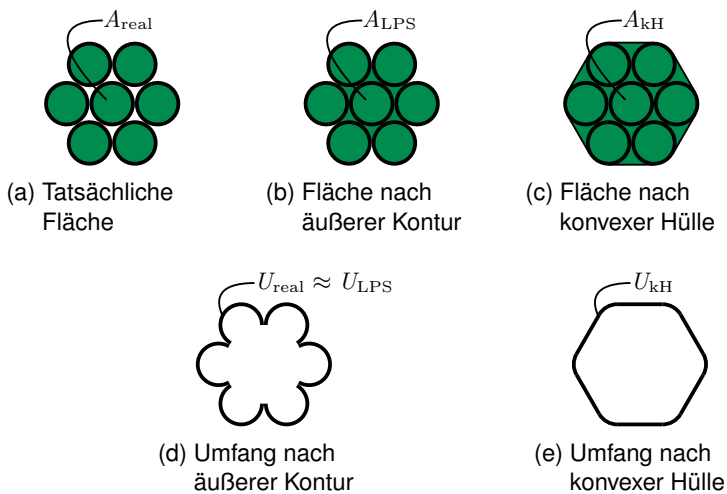


Abb. 3.27: Umfang und Fläche von Seilen nach unterschiedlichen Betrachtungsweisen

Die Nutzung der konvexen Hülle bietet sich an, da auch bei der Anwendung des Messschieberprinzips zur Durchmesserermittlung nicht alle Punkte berücksichtigt werden. Vielmehr sind die Punkte relevant, die der konvexen Hülle des Querschnitts angehören. Für einen Körper ist der mittlere Durchmesser

(d_{mean}) und der aus dem Umfang des Körpers mit der Kreisformel berechnete Durchmesser $d_{\text{Kr,U,kH}}$ identisch [PG07].

Um eine einfache Vergleichbarkeit zwischen den verschiedenen Längen und Flächen zu ermöglichen, werden alle Größen auf Durchmesser zurückgerechnet. Vereinfacht werden dazu die Formeln eines Kreises angewendet. Kenngrößen, die sich durch die Umrechnung mit Kreisformeln ergeben, sind mit dem Subskript Kr gekennzeichnet.

Diese Vereinfachung ist unkritisch, da vor allem gleiche Kenngrößen verschiedener Seile oder Experimente verglichen werden sollen.

Wie in Kapitel 2 beschrieben wird als Ersatzmodell für einen Seilquerschnitt neben einem Kreis auch eine Ellipse (Kapitel 2.3.2) zur Charakterisierung verwendet.

Zum Vergleich der ermittelten Werte mit entsprechenden Werten von Ellipsen werden die Größen nach folgenden Formeln berechnet. Die Ellipse kann allgemein mit

$$\frac{x_{\text{Ell}}^2}{a^2} + \frac{y_{\text{Ell}}^2}{b^2} = 1 \quad (3.4)$$

mit

$$a = \frac{d_{\text{max}}}{2} \quad (3.5)$$

$$b = \frac{d_{\text{min}}}{2} \quad (3.6)$$

berechnet werden (Abb. 3.28) [MW06] .

Die Fläche einer Ellipse

$$A_{\text{Ell}} = a \cdot b \cdot \pi \quad (3.7)$$

kann ebenfalls einfach berechnet werden [MW06].

Der Umfang einer Ellipse lässt sich mithilfe einer numerischen Integration be-

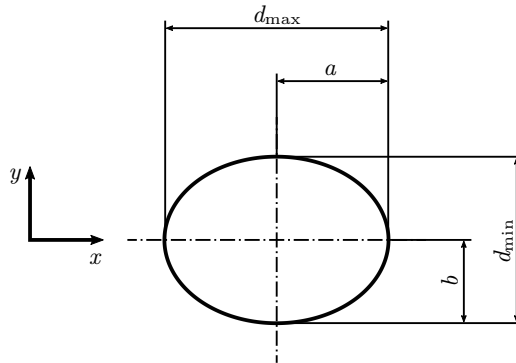


Abb. 3.28: Ellipse mit Angabe von Durchmessern und Halbachsen

rechnen. Alternativ gibt es Näherungen. Aufgrund der einfacheren Berechnung des Umfangs

$$U_{\text{Ell}} = \pi \cdot \left((a + b) + \frac{3 \cdot (a - b)^2}{10 \cdot (a + b) + \sqrt{a^2 + 14 \cdot a \cdot b + b^2}} \right) \quad (3.8)$$

und des geringen Fehlers wird die Näherung von RAMANUJAN angewendet [AB88].

Der Fehler kann mit

$$\varepsilon = 3 \cdot \pi \cdot a \frac{\sqrt{(a^2 - b^2)}^{20}}{2^{36}} \quad (3.9)$$

abgeschätzt werden.

Die sich nach den beschriebenen Vorgehen ergebenden möglichen Kenngrößen für Seilquerschnitte sind in Tab. 3.5 zusammengefasst.

Da es sich bei den Seilquerschnitten nicht um ideale Ellipsen handelt, liegen die Achsen der ermittelten maximalen und minimalen Durchmesser in der Regel nicht orthogonal zueinander. Zwischen den beiden Achsen kann somit ein von 90° abweichender Winkel γ vorliegen (Abb. 3.29). Diese Eigenschaft des

Seilquerschnitts wird mit dem Kennwerte der Orthogonalität (Gleichung (3.19)) beschrieben.

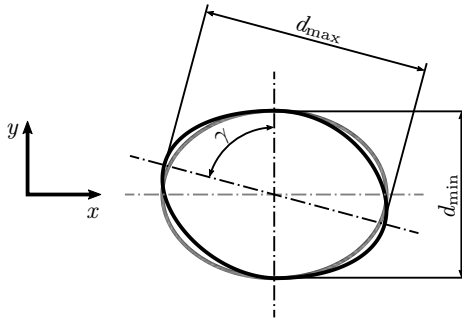


Abb. 3.29: Ellipse mit verdrehten Durchmessern

In der Auswertung der Seilquerschnitte zeigt sich, dass nicht alle Durchmesser und Kenngrößen gleichermaßen sinnvoll einsetzbar sind. So weisen die Größen, die sich auf den aufgenommenen Querschnitt beziehen (Subskript $_{LPS}$), eine relativ große Streuung auf. Dies ist besonders bei Seilen mit einer ungleichmäßigen Oberfläche aufgrund ausgeprägter Litzentäler also den Seilen 1.2 und 2.1 der Fall. Die Ursache dafür ist in unterschiedlichen Blickwinkeln der LPS in die Litzentäler zu sehen. Je nach aktueller Lage erscheint das Tal mehr oder weniger tief. Aus diesem Grund werden in den folgenden Betrachtungen einige Größen für sich genommen nicht weiter berücksichtigt: $d_{Kr,U,LPS}$, $d_{Kr,A,LPS}$, $Ell_{U,LPS}$ und $Ell_{A,LPS}$.

Auch die Kenngröße der Zirkularität der konvexen Hülle Z_{KH} wird nicht weiter verfolgt. Durch die Anwendung der konvexen Hülle wird die Oberfläche bereits geglättet, und dadurch zeigen sich keine deutlichen Unterschiede zwischen den Seilen unterschiedlicher Machart.

Die ermittelten Durchmessergrößen können zwischen verschiedenen Seilen oder mit dem Nenndurchmesser verglichen werden. Bei einem ideal runden Seil ergibt sich eine Übereinstimmung von $d_{Kr,U,kH}$ und $d_{Kr,A,kH}$ mit dem Seilstdurchmesser. Die Zirkularität für einen idealen Kreis ergibt sich zu $Z_{LPS} = 1$. Ebenfalls eins ist der Wert der Konvexität, wenn ein konvexer Querschnitt vorliegt.

Tab. 3.5: Variablen zur Beschreibung von Seilquerschnitten

Variable	Beschreibung
d_M	Menge der nach dem Messschieberprinzip ermittelten Durchmesser
d_{\max}	größter Durchmesser des untersuchten Querschnitts
d_{\min}	kleinster Durchmesser des untersuchten Querschnitts
d_{mean}	Mittelwert aus allen ermittelten Durchmessern des untersuchten Seilquerschnitts
	gleich dem Durchmesser eines Kreises mit gleichem Umfang wie der Querschnitt
$d_{K_{r,U,LPS}}$	Umfangsdurchmesser: Durchmesser eines Kreises gleichen Umfangs wie der Seilquerschnitt
$d_{K_{r,U,KH}}$	Umfangsdurchmesser: Durchmesser eines Kreises gleichen Umfangs wie die konvexe Hülle des Seilquerschnitts
$d_{K_{r,A,LPS}}$	Flächendurchmesser: Durchmesser eines Kreises gleicher Fläche wie der Seilquerschnitt
$d_{K_{r,A,KH}}$	Flächendurchmesser: Durchmesser eines Kreises gleicher Fläche wie die konvexe Hülle des Seilquerschnitts
R_{rel}	relative Rundheit ist ein Maß für die Deformation von Querschnitten
O	Orthogonalität ist ein Maß zur Beurteilung des Winkels zwischen dem minimalen und maximalen Durchmesser des Querschnitts

Fortsetzung auf Folgeseite

Tab. 3.5: Variablen zur Beschreibung von Seilquerschnitten (Fortsetzung)

Variable	Beschreibung
K	$K = \frac{A_{LPS}}{A_{kH}} \quad (3.20)$ <p>Konvexität ist ein Maß für das Verhältnis zwischen der Fläche die durch alle Punkte und die Fläche die durch die Punkte der konvexen Hüllen eingeschlossen sind</p>
Z_{LPS}	$Z_{LPS} = \frac{\sqrt{A_{LPS} \cdot \pi \cdot 4}}{U_{LPS}} \quad (3.21)$ <p>Zirkularität des aufgenommenen Querschnitts ist ein Maß für das Verhältnis des Umfangs eines Kreises berechnet aus der Fläche des Querschnitts zum tatsächlichen Umfang des Querschnitts [Sti9]</p>
Z_{kH}	$Z_{kH} = \frac{\sqrt{A_{kH} \cdot \pi \cdot 4}}{U_{kH}} \quad (3.22)$ <p>Zirkularität der konvexen Hülle des Querschnitts ist ein Maß für das Verhältnis des Umfangs eines Kreises berechnet aus der Fläche der konvexen Hülle des Querschnitts zum tatsächlichen Umfang der konvexen Hülle des Querschnitts [Sti9]</p>
$Ell_{U,LPS}$	$Ell_{U,LPS} = \frac{U_{Ell}(d_{max}, d_{min})}{U_{LPS}} \quad (3.23)$ <p>Umfangsellipsität des aufgenommenen Querschnitts ist ein Maß für das Verhältnis des Umfangs einer Ellipse berechnet aus den Achsen minimaler und maximaler Durchmesser des Querschnitts zum tatsächlichen Umfang des Querschnitts</p>
$Ell_{U,kH}$	$Ell_{U,kH} = \frac{U_{Ell}(d_{max}, d_{min})}{U_{kH}} \quad (3.24)$ <p>Umfangsellipsität der konvexen Hülle ist ein Maß für das Verhältnis des Umfangs einer Ellipse berechnet aus den Achsen minimaler und maximaler Durchmesser des Querschnitts zum tatsächlichen Umfang der konvexen Hülle</p>
$Ell_{A,LPS}$	$Ell_{A,LPS} = \frac{A_{Ell}(d_{max}, d_{min})}{A_{LPS}} \quad (3.25)$ <p>Flächenellipsität des aufgenommenen Querschnitts ist ein Maß für das Verhältnis der Fläche einer Ellipse berechnet aus den Achsen minimaler und maximaler Durchmesser des Querschnitts zur tatsächlichen Fläche des Querschnitts</p>

Fortsetzung auf Folgeseite

Tab. 3.5: Variablen zur Beschreibung von Seilquerschnitten (Fortsetzung)

Variable	Beschreibung
$Ell_{A,kH}$	$= \frac{A_{Ell}(d_{max}, d_{min})}{A_{rH}} \quad (3.26)$ <p>Flächenellipsität der konvexen Hülle ist ein Maß für das Verhältnis der Fläche einer Ellipse berechnet aus den Achsen minimaler und maximaler Durchmessers des Querschnitts zur Fläche der konvexen Hülle</p>

Die Auswertung der Orthogonalität ist bei von der Kreisform abweichenden (beispielsweise elliptischen) Querschnitten sinnvoll. Bei einer Ellipse liegt eine Orthogonalität von $O = 1$ vor. Die Ellipsität dient dem Vergleich eines Querschnitts mit einer Ellipse, die aus den ermittelten Durchmessern d_{\max} und d_{\min} berechnet wird.

Wie sich die Ellipsität für verschiedene Formen und Zustände darstellt, wird im Folgenden gezeigt.

Im Wickelpaket deformieren sich die runden oder elliptischen Seilquerschnitte. Für runde Querschnitte ist die maximale Deformation in Abb. 3.30 zu sehen.

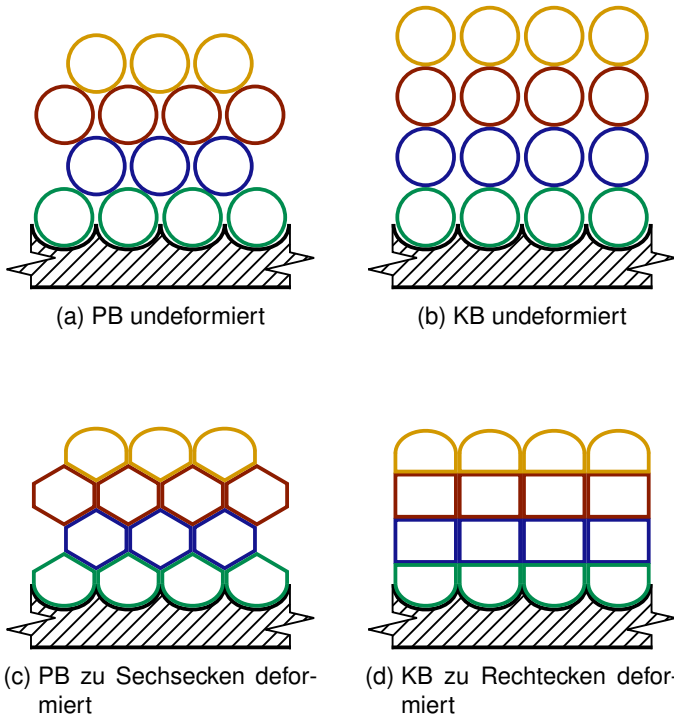


Abb. 3.30: Undeformierte Seilquerschnitte und theoretisch maximal deformierte Seilquerschnitte im Parallelbereich und im Kreuzungsbereich

Bei der pyramidenförmigen Anordnung im PB und der stapelförmigen Anordnung im KB sind unterschiedliche Deformationen zu erwarten (vgl. Abb. 2.20).

Im PB ist eine Deformation bis hin zu Sechsecken (Subskript ₆) (vgl. Abb. 2.12 und [Erl19]) und im KB eine bis hin zu Rechtecken (Subskript ₄) theoretisch möglich. Daher werden diese beiden Formen näher untersucht.

Eine fälschliche Annahme als Ellipse kann für ein Rechteck oder ein Sechseck erfolgen, wenn ihr maximaler und minimaler Durchmesser denen einer Ellipse entsprechen. Es kann ein Rechteck gefunden werden, bei dem der maximale Durchmesser über die Diagonale gemessen dem maximalen Durchmesser einer Ellipse entspricht. Wird nun eine Höhe so bestimmt, dass diese dem minimalen Durchmesser der entsprechenden Ellipse gleicht, wird die andere Höhe kleiner, als die zuvor betrachtete. Damit ist es nicht möglich, ein zum Rechteck deformierten Querschnitt fälschlich als eine Ellipse auszuwerten. Anders verhält es sich für Sechsecke. Diese lasse sich so konstruieren, dass über die größte Diagonale d_{\max} und über die beiden nächsten gegenüberliegenden Seiten d_{\min} gemessen wird. Insgesamt ergibt sich damit eine Gleichheit der extremen Durchmesser

$$\max(d_{M,6}) = d_{\max, \text{Ell}} \text{ und} \quad (3.27)$$

$$\min(d_{M,6}) = d_{\min, \text{Ell}} \quad (3.28)$$

zwischen Sechseck und Ellipse.

Für ausgewählte Werte gleicher relativer Rundheit sind Sechsecke im Vergleich zur entsprechenden Ellipse in Abb. 3.31 abgebildet.

Die aus dem Vergleich von Fläche und Umfang gewonnene Ellipsität (Gleichung (3.24) und (3.26)) ist in Abb. 3.32 zu sehen.

Die Umfangsellipsität des Sechsecks verläuft zunächst mit einem Wert von ungefähr 0,96, bis er mit zunehmender relativer Rundheit stark ansteigt. Die Flächenellipsität hat ein Minimum von 1,02, welches am dichtesten an 1 liegt. Weil der Verlauf der Umfangsellipsität auch den Wert eins annimmt, sollten immer beide Werte betrachtet werden. Aus allen Verläufen kann somit der Bereich guter Übereinstimmung mit einer Ellipse für zu untersuchende Seilquerschnitte mit

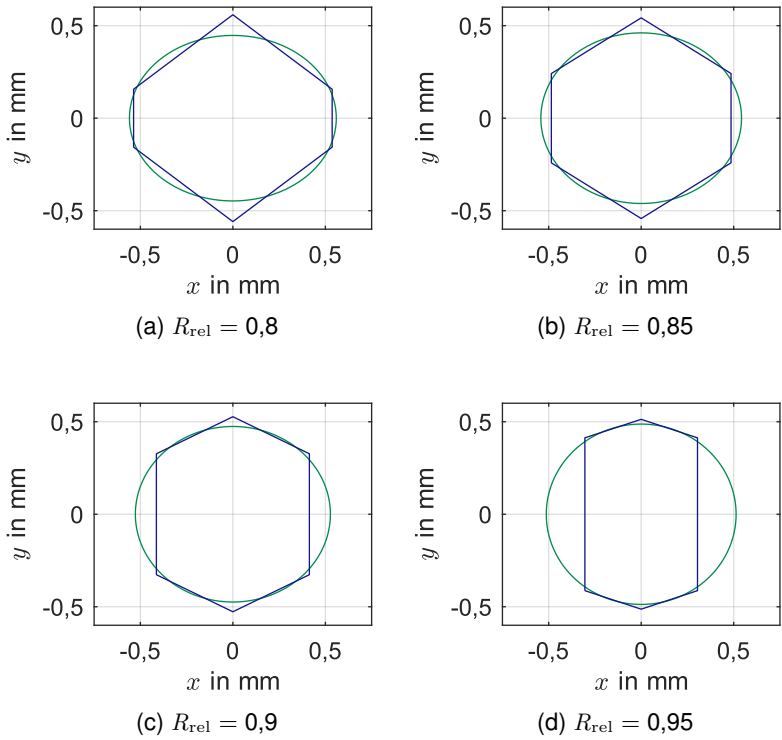


Abb. 3.31: Vergleich von Sechseck und Ellipse mit gleicher relativer Rundheit ($d_r = 1 \text{ mm}$)

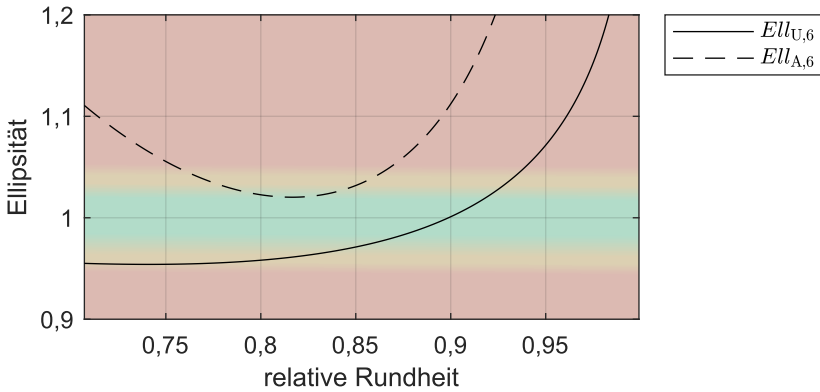


Abb. 3.32: Flächen- und Umfangsellipsität von Rechteck und Sechseck mit Angabe des Bereichs guter Übereinstimmung ($0,975 \leq Ell \leq 1,025$) und befriedigender Übereinstimmung ($0,95 \leq Ell \leq 1,05$) eines zu untersuchenden Seilquerschnitts mit einer Ellipse

$$0,975 \leq Ell \leq 1,025 \quad (3.29)$$

angegeben werden. Für diese Querschnitte ist der Fehler relativ gering, wenn er mit den Gleichungen einer Ellipse behandelt wird. Als Bereich erweiterter Übereinstimmung wird der Bereich

$$0,95 \leq Ell \leq 1,05 \quad (3.30)$$

gewählt.

Wenn eine ausreichende Übereinstimmung mit einer Ellipse gegeben ist, kann die relative Rundheit genutzt werden, um den entsprechenden maximalen und minimalen Durchmesser einer Ellipse zurück zu berechnen. Die Seildurchmesser

$$d_{\max}(R_{\text{rel}}) = d_r \cdot R_{\text{rel}}^{a_{\max}} \quad \text{und} \quad (3.31)$$

$$d_{\min}(R_{\text{rel}}) = d_r \cdot R_{\text{rel}}^{a_{\min}} \quad (3.32)$$

mit:

- d_r Durchmesser eines theoretisch runden Seils,
- a_{\max} Exponent zur Beschreibung des Verlaufs von d_{\max} und
- a_{\min} Exponent zur Beschreibung des Verlaufs von d_{\min}

können allgemein in Abhängigkeit der relativen Rundheit angegeben werden. Mit der Kenntnis der drei Kennwerte lassen sich für ein Seil die sich einstellen- den Durchmesser in Abhängigkeit der relativen Rundheit berechnen.

Die Fläche der Ellipse

$$A_{\text{Ell}}(R_{\text{rel}}) = d_r^2 \cdot R_{\text{rel}}^{a_F} \cdot \frac{\pi}{4} \quad (3.33)$$

mit:

$$a_F = a_{\max} + a_{\min} \quad \text{Flächenexponent}$$

kann anschließend berechnet werden. Je nach Größe des Flächenexponenten verhält sich die Fläche des Seils in Abhängigkeit der relativen Rundheit unterschiedlich. Für

- $a_F = 0$ bleibt die Fläche konstant, wohingegen sie für
- $a_F > 0$ kleiner wird und für
- $a_F < 0$ größer wird.

Für den Flächenexponent $a = 0$ sind Ellipsen in Abb. 3.33 dargestellt.

Der Verlauf des maximalen und des minimalen Durchmessers mit den Exponenten $a_{\max} = -0,5$ und $a_{\min} = 0,5$ ist in Abb. 3.34 zu sehen.

Alle Seildurchmesser (d_{xx}) werden in den Ergebnissen zur einfacheren Vergleichbarkeit als relative Durchmesser

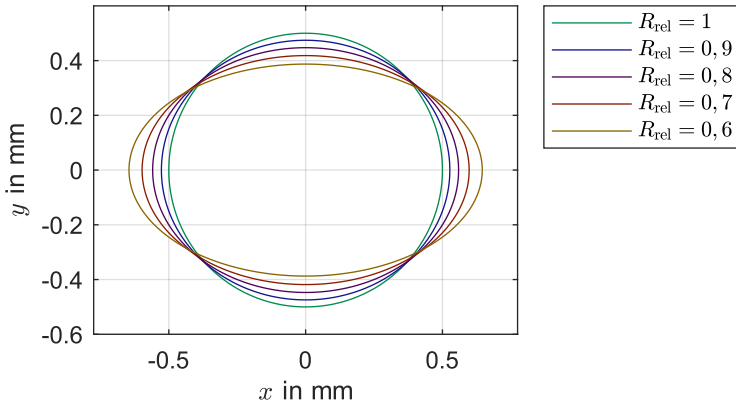


Abb. 3.33: Ellipsen gleicher Fläche und unterschiedlicher relativer Rundheit

$$d_{xx,rel} = \frac{d_{xx}}{d_n} \quad (3.34)$$

bezogen auf den Nenndurchmesser dargestellt.

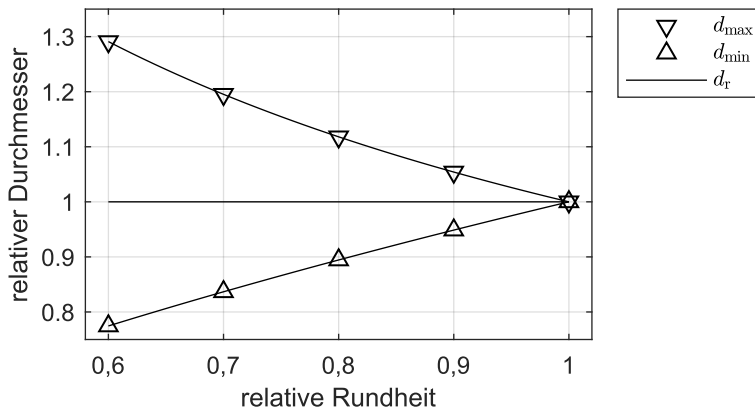


Abb. 3.34: Verlauf der Seildurchmesser d_{min} und d_{max} in Abhängigkeit der relativen Rundheit R_{rel}

3.2.4 Seilquerschnitt – Ergebnisse aus Wickelversuchen

Die Durchführung des Wickelversuchs findet wie in Kapitel 3.2 beschrieben statt. Die Untersuchung des Seilquerschnitts wird am von der Trommel ablaufenden Seil durchgeführt. Die Auswertung der Seilquerschnitte ist in Kapitel 3.2.3 beschrieben.

Der maximale und der minimale Durchmesser des Seils 1.3 ist exemplarisch für die letzten zwei Versuchswiederholungen in Abb. 3.35 zu sehen.

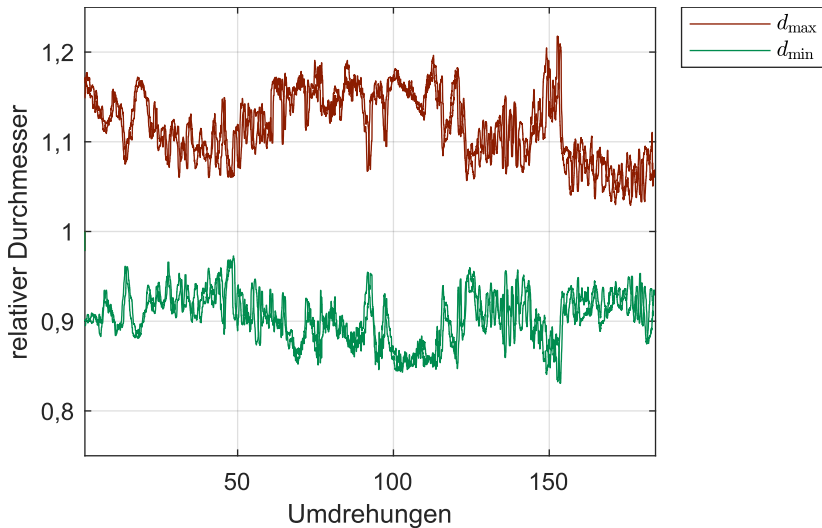


Abb. 3.35: Verlauf der Seildurchmesser d_{\min} und d_{\max} in zwei Wickelversuchen von Seil 1.3

Die Verläufe sind mit einem Medianfilter gefiltert. Es sind erhebliche Unterschiede in den gemessenen Durchmessern zu erkennen. Diese zeigen im Vergleich zwischen den dargestellten (und auch den übrigen Wiederholungen) eine gute Übereinstimmung. Die Unterschiede sind damit nicht auf zufällige Streuungen, sondern auf tatsächliche Unterschiede am Seilquerschnitt zurückzuführen. Diese können durch die Fertigung und das mehrlagige Wickeln begründet sein.

In Abb. 3.36 ist für die letzte Durchführung des Wickelversuchs von Seil 1.3 der Verlauf des maximalen und minimalen Seildurchmessers mit Angabe des

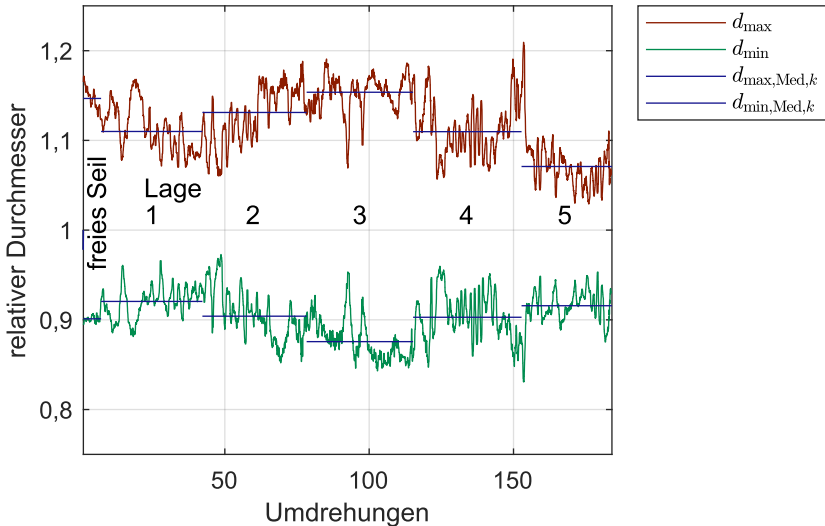


Abb. 3.36: Verlauf der Seildurchmesser mit Angabe der Mediane je Lage im Wickelversuch von Seil 1.3

Medians je Lage zu sehen.

Aufgrund der Untersuchung des ablaufenden Seils und der Positionierung der LPS nahe der Seilscheibe ist der Bereich des Seils, der innerhalb der ersten Umdrehungen durch die LPS läuft, nicht auf der Trommel aufgelaufen. Dieser Teil des Seils wird durch die Seilscheibe, den Spill und die Speichertrommel des Prüfstands zusätzlich zur Seilkraft beeinflusst (vgl. Abb. 3.3).

Im weiteren Abwickeln wird das Seil in umgekehrter Reihenfolge der Lagen untersucht. In Abb. 3.37 ist das Ergebnis des Medians je Lage der extremen Durchmesser für alle Wickelversuche von Seil 1.3 in einem Boxplot zu sehen (nun in aufsteigender Reihenfolge der Lagen, umgekehrt im Vergleich zu Abb. 3.36).

Es ist erkennbar, dass es zwischen den verschiedenen Versuchsdurchführungen eine gute Übereinstimmung gibt. Dies trifft damit auch für die berechnete relative Rundheit zu (Abb. 3.38).

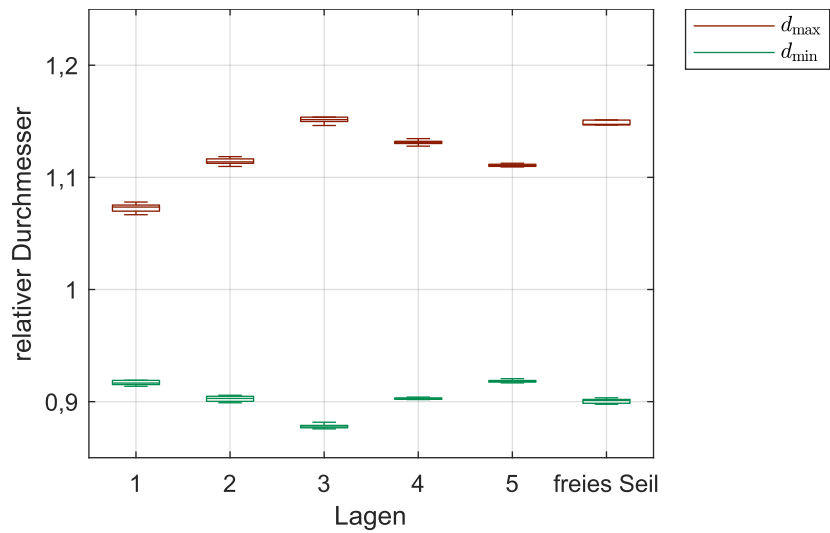


Abb. 3.37: Boxplot des Seildurchmessers je Lage in Wickelversuchen von Seil 1.3 (umgekehrte Reihenfolge im Vergleich zu Abb. 3.36)

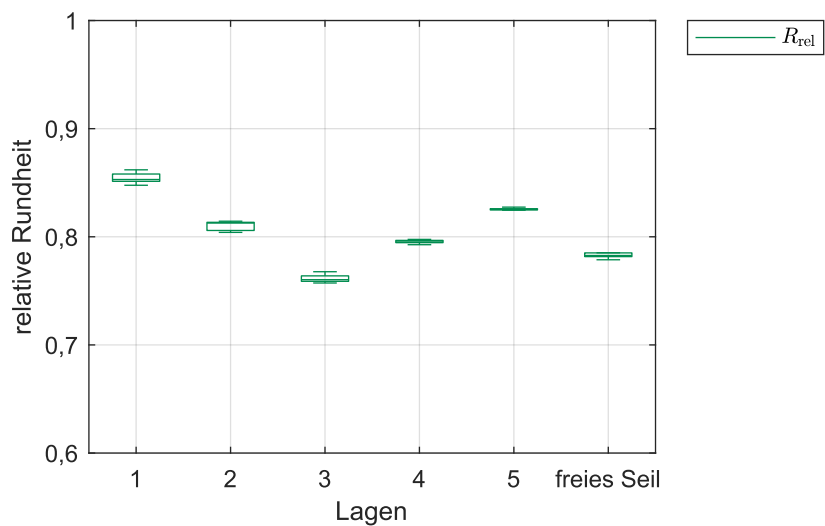


Abb. 3.38: Boxplot relative Rundheit je Lage in Wickelversuchen von Seil 1.3

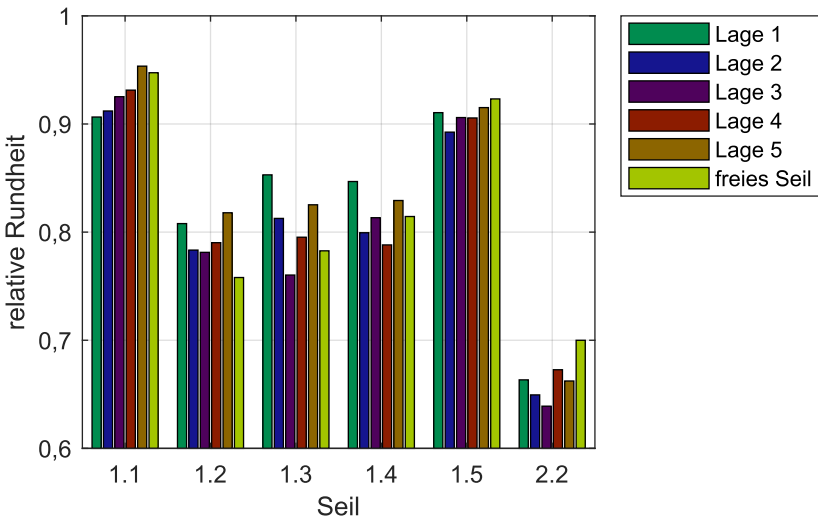


Abb. 3.39: Relative Rundheit von Faserseilen je Lage in Wickelversuchen

Es ist eine starke Variation der extremen Durchmesser (Abb. 3.37) und der relativen Rundheit in Abhängigkeit der Lagen erkennbar (Abb. 3.38). Mit zunehmender Lagenzahl nimmt die relative Rundheit zuerst bis zur dritten Lage hin ab und steigt zur fünften hin wieder an. Der Bereich des Seils, der nicht auf die Trommel aufläuft und somit nicht mehrlagig gewickelt wird, hat eine von dem Verlauf abweichende relative Rundheit.

Dieses Verhalten zeigen neben Seil 1.3 auch Seil 1.2 und mit jeweils einer abweichenden Lage die Seile 1.4 und 2.2. Seil 1.1 hat demgegenüber einen zunehmende relative Rundheit mit zunehmender Lagenzahl. Seil 1.5 hat einen zunehmenden Verlauf, bei dem die erste Lage vom Verlauf der weiteren abweicht (Abb. 3.39).

Aufgrund des zunehmenden Wickeldrucks für die unteren Lagen ist der Verlauf von Seil 1.1 zu erwarten. Durch die hohe Querschnittstabilität dieses Seils mit zusätzlichem Kern und dem Mantel wirken keine anderen maßgeblichen Effekte auf den Seilquerschnitt als der Wickeldruck. Seil 1.5 weist ebenfalls einen zusätzlichen Kern auf und hat damit einen ähnlichen Verlauf.

Die übrigen Seile weisen einen näherungsweise V-förmigen Verlauf auf. Das

bedeutet, dass von der ersten Lage aus die relative Rundheit zunächst sinkt. Anschließend steigt sie wieder hin zur fünften Lage. Dieser Verlauf ist durch die geringe Querschnittstabilität der betreffenden Seile begründet. In den unteren Lagen wird das Seil neben dem Wickeldruck auch durch die Rillung beeinflusst. Die Rillung stützt das Seil in der ersten Lage. In der zweiten bleibt die Ordnung im PB durch den pyramidenförmigen Aufbau zunächst erhalten (vgl. ungeordneten Wickelverlauf in der dritten Lage in Abb. 3.16). Dadurch wird der Seilquerschnitt trotz des höheren Wickeldrucks in den unteren Lagen nicht so stark irreversibel deformiert. Der Grund für die abnehmende Stützwirkung ist die zunehmende Deformation des Querschnitts. Die stärkste Deformation von Seil 1.2, Seil 1.3 und Seil 2.2 ist in der dritten Lage zu erkennen. Diese mittlere Lage wird nicht mehr so gut gestützt wie die ersten beiden. Daher ist ab da eine Deformation in Abhängigkeit vom Wickeldruck zu erkennen. In den letzten Lagen wird der Wickeldruck wieder geringer und führt zu einer höheren relativen Rundheit.

Abschließend sind die ermittelten Kennwerte zu den Seilquerschnitten aus den Wickelversuchen angegeben. Es sind jeweils die Mediane aus den durchgeführten Experimenten abgebildet.

In Abb. 3.40a sind die relativen Durchmesser dargestellt. Bei Seil 1.3 fällt die geringe Streuung der Werte im Gegensatz zu den übrigen Seilen auf. Bei den Seilen 1.1 und 1.5 liegen alle relativen Durchmesser über eins und damit alle Durchmesser über dem Nenndurchmesser des jeweiligen Seils.

Die Ellipsität der Seilquerschnitte liegt in den durchgeführten Wickelversuchen bis auf den Wert der Flächenellipsität von Seil 2.2 alle im Bereich der guten Übereinstimmung mit einer Ellipse. Aber auch dieser eine Wert liegt noch im Bereich der befriedigenden Übereinstimmung (Abb. 3.32).

Abb. 3.41a zeigt die relative Rundheit und die Orthogonalität der Seilquerschnitte in den Wickelversuchen. Die Seile 1.1 und 1.5 mit ihrem Kern und im Fall von Seil 1.1 mit dem Mantel haben die höchsten Werte für die relative Rundheit. Gleichzeitig haben sie im Gegensatz zu den übrigen Seilen einen niedrigeren Wert für die Orthogonalität. Dies zeigt sich auch in einer hohen negativen Korrelation von $-0,7125$. Dieses Phänomen ist dadurch zu erklären, dass bei Seilen mit einer höheren relativen Rundheit die extremen Durchmesser vom Winkel γ zueinander stärker streuen und sich dadurch der niedrigere

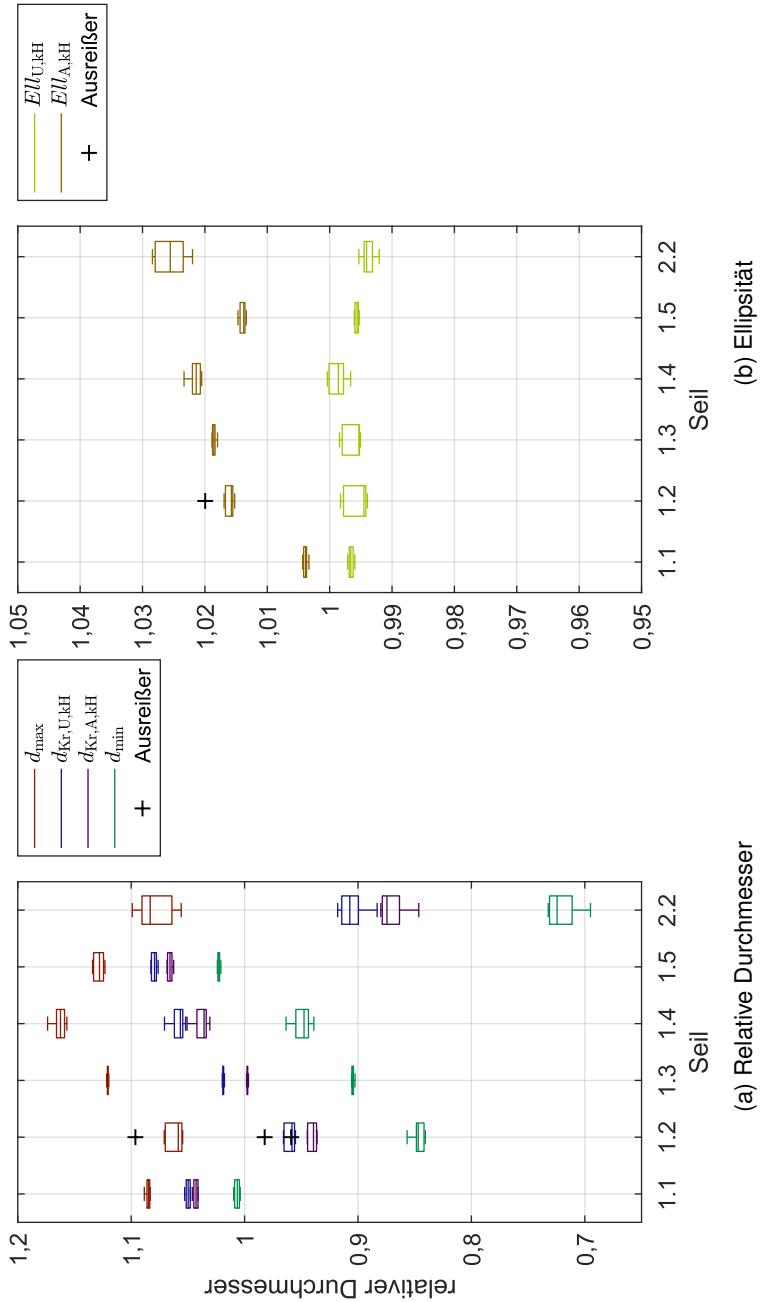
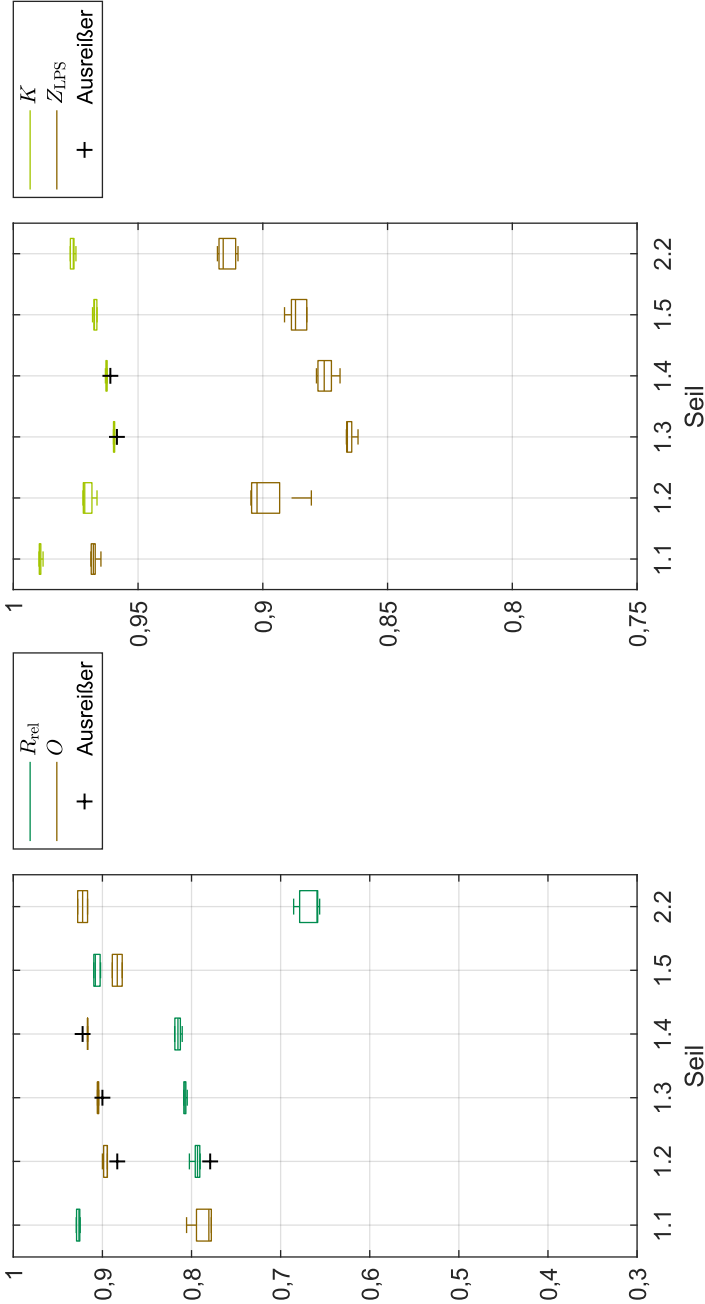


Abb. 3.40: Ergebnisse zum Seilquerschnitt der Wickelversuche



(a) Relative Rundheit und Orthogonalität

(b) Konvexität und Zirkularität

Abb. 3.41 : Ergebnisse zum Seilquerschnitt der Wickelversuche

Wert für die Orthogonalität ergibt.

Die Werte für die Konvexität und die Zirkularität liegen für Seil 1.1 aufgrund des Mantels erwartungsgemäß am höchsten. Auffällig ist die hohe Konvexität von Seil 2.2. Aufgrund der starken Deformation hätte ein geringerer Wert erwartet werden können. Wegen des weichen Aufbaus der Litzen kommt es jedoch zu einer relativ gleichmäßigen Oberfläche. Im Gegensatz dazu hat Seil 1.3 relativ stabile Litzen und zeigt daher in der Zirkularität einen deutlich geringen Wert im Vergleich zu den übrigen Seilen (Abb. 3.41b).

3.3 Querdruckversuche

Das Ziel der Querdruckversuche ist es, das Seil in einem vereinfachten Umfeld zu testen. Dazu wird die Situation auf der mehrlagig bewickelten Seiltrommel nachgebildet. Wichtige Einflussgrößen wie die Seilkraft, die durch die Nutzlast bewirkt wird (Abb. 3.42), und die Querkraft, die durch das Umwickeln auf die Seiltrommel und den Druck in der Mehrlagenwicklung entsteht (Abb. 3.43), werden auf das Seil ausgeübt. Insgesamt kann damit das Verhalten von Seilen unter verschiedenen Belastungskombinationen geprüft werden. Ein Prüfstand zur vereinfachten Untersuchung der Seileigenschaften steht am Institut für Maschinenwesen (IMW) zur Verfügung.

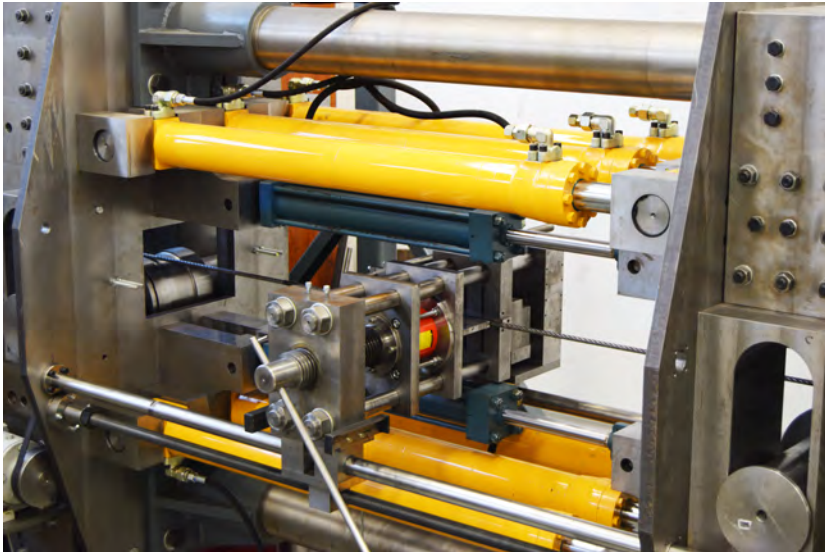


Abb. 3.42: Querdruckprüfstand: Zylinder zur Aufbringung der Seilzugkraft (gelb und blau)

Die wesentliche Vereinfachung ist, dass das Seil im geraden Zustand untersucht wird. Dieses Vorgehen hat sich zur Untersuchung von Seilen hinsichtlich ihrer Einsatzmöglichkeiten in der Mehrlagenwicklung bewährt [Die71], [Hen99], [Mup01], [Sch11].

Der Aufbau zur Aufbringung der Querkraft auf das Seil ist in Abb. 3.44 dargestellt.

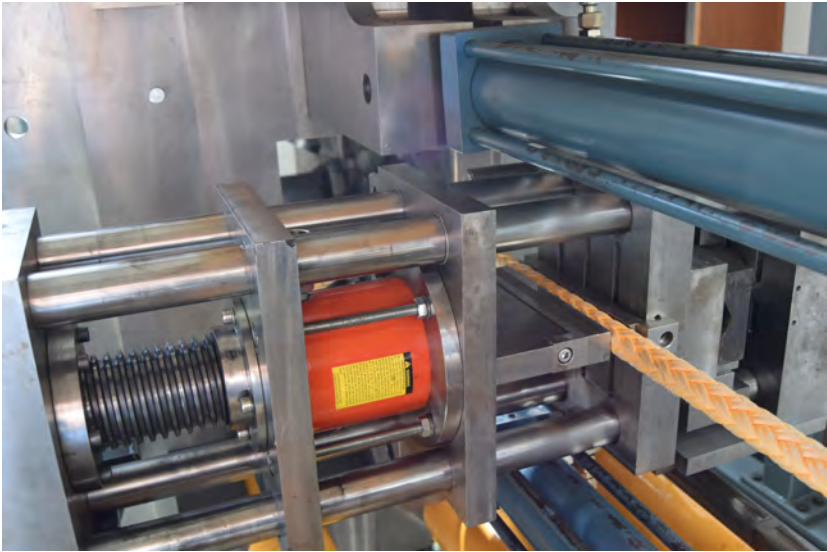


Abb. 3.43: Querdruckprüfstand: Zylinder zur Aufbringung der Querkraft (orange)

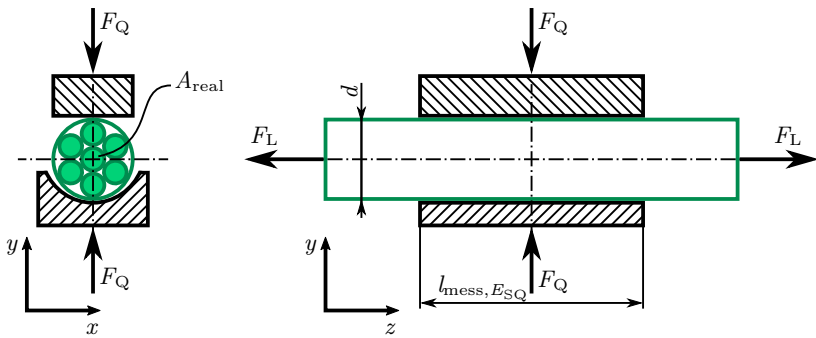


Abb. 3.44: Prinzipieller Aufbau des Querdruckversuchs

Nachdem die Seilkraft angelegt ist, wird anschließend die Querkraft in mindestens zehn Zyklen aufgebracht. Die Querkraft wird über einen Stempel und über eine Rillung entsprechend der auf der Trommel genutzten Rillung aufgebracht. Die untersuchte Länge beträgt in den Versuchen $l_{\text{mess}, E_{\text{SQ}}} = 200 \text{ mm}$.

Um ein Seil vollständig zu untersuchen, werden verschiedene Seilkräfte in Kombination mit verschiedenen Querkraften getestet. Die Seilkraft wird entsprechend gängiger Anwendungen in Größen von 5 %, 10 %, 20 % und 30 % der MBF aufgebracht. Aus der Seilkraft lässt sich mithilfe des realen Seilquerschnitts (vgl. Abb. 3.44) die Längsspannung

$$\sigma_L = \frac{F_S}{A_{\text{real}}} \quad (3.35)$$

berechnen.

Die Querspannung, die auf das Seil wirkt, lässt sich aus der Situation auf der Seiltrommel ableiten. Wird eine halbe Umwicklung ohne Reibung betrachtet, wirken an beiden Seilenden die Seilkraft

$$2 \cdot F_L = \sigma_Q \cdot s \cdot D \quad (3.36)$$

mit:

$$s = \sqrt{A_{\text{real}}} \quad \text{Kantenlänge berechnet aus einem Quadrat mit der realen Querschnittsfläche des Seils (vgl. Abb. 3.27)}$$

die dem Querdruck zwischen Seil und Trommel und der Querspannung im Seil entsprechen [Mup01].

Aus der Kombination von Gleichung (3.35) und Gleichung (3.36) kann das Querspannungsverhältnis

$$k_Q = \frac{\sigma_Q}{\sigma_L} = \frac{2 \cdot \sqrt{A_{\text{real}}}}{D} \quad (3.37)$$

abgeleitet werden [Mup01].

Mit der Hilfe gängiger D/d -Verhältnisse kann ein relevanter Wertebereich für k_Q bestimmt werden. In Kombination mit den Kenndaten des Seils und des Versuchsaufbaus werden die für den Versuch notwendigen Querkkräfte berechnet. Insgesamt ergibt sich aus den genannten Werten eine Versuchsmatrix. Die Versuche in diesem Kapitel wurden nach Tab. 3.6 durchgeführt.

Tab. 3.6: Versuchsmatrix Querdruckversuche

	k_Q	0,02	0,04	0,06	0,08	0,1
Querkraft F_Q	$f(F_L)$	$f(F_L)$	$f(F_L)$	$f(F_L)$	$f(F_L)$	$f(F_L)$
Längskraft F_L						
5 % MBF						
10 % MBF						
20 % MBF						
30 % MBF						

Für die Versuchsdurchführung wird die Seilkraft beginnend mit der kleinsten eingestellt und anschließend werden alle zugehörigen Querkkräfte abgeprüft. Anschließend wird die Seilkraft erhöht und so das komplette Versuchsprogramm bearbeitet.

Um eine gute Durchführbarkeit des Versuchs gewährleisten zu können, werden sämtliche Messungen an derselben Stelle des Seils ausgeführt. Dies kann bedeuten, dass nachdem bereits eine höhere Querkraft aufgebracht wurde wieder eine kleinere folgt. Dies allerdings in Kombination mit einer erhöhten Seilkraft. Insgesamt hat sich gezeigt, dass dieses Verfahren eine zulässige Vereinfachung ist.

Nachdem das Seil in den Prüfstand montiert wurde, wird es vor Beginn der eigentlichen Prüfung mit 5 Zyklen auf 50 % der MBF belastet, um Unregelmäßigkeiten im Seil zum Beispiel durch Aufrollen beim Transport zu eliminieren.

Die Ergebnisse aus dem Versuch umfassen zwei Bereiche. Der Seilquerschnitt wird in Kapitel 3.3.1 untersucht und ermöglicht eine Aussage über die irreversible Deformation nach einer bestimmten Lastkombination aus Tab. 3.6. In Kapitel 3.3.3 wird die elastische, also die reversible Deformation in Form des Querelastizitätsmoduls für dieselben Lastkombinationen untersucht.

3.3.1 Seilquerschnitt – Ergebnisse aus Querdruckversuchen

Aufbau und Ablauf der Seilbelastung ist in Kapitel 3.3 beschrieben. Die Querschnittsmessung mit den LPS wird wie in Kapitel 3.2.3 angegeben durchgeführt (Messaufbau nach Abb. 3.22). Da die irreversible Deformation gemessen wird, erfolgt die Messung des Querschnitts immer nach der Aufbringung der Querkraft.

Die Belastungskombinationen werden entsprechend Tab. 3.6 gewählt. Zusätzlich wird der Seilquerschnitt auch vor der Aufbringung der Querkraft für alle Stufen der Seilkraft gemessen. Der Messbereich $l_{\text{mess}, R_{\text{rel}}} = 140 \text{ mm}$ (Abb. 3.45) ist dazu kleiner gewählt im Vergleich zur Seillänge, auf die die Querkraft aufgebracht wird ($l_{\text{mess}, E_{\text{SQ}}} = 200 \text{ mm}$). Dies dient dazu, nicht im Übergangsbereich zu messen. Für jede Laststufe werden 20 Messungen entlang der Seillängsachse durchgeführt. Zur Ermittlung der Messpositionen wird der Messbereich in gleiche Abstände entsprechend der Anzahl der einzelnen Querschnittsmessungen unterteilt. Bezüglich der Schlag- oder Flechtlänge ergeben sich dadurch zufällige Messpositionen. Dadurch wird eine repräsentative Messung des Seilquerschnitts sichergestellt.

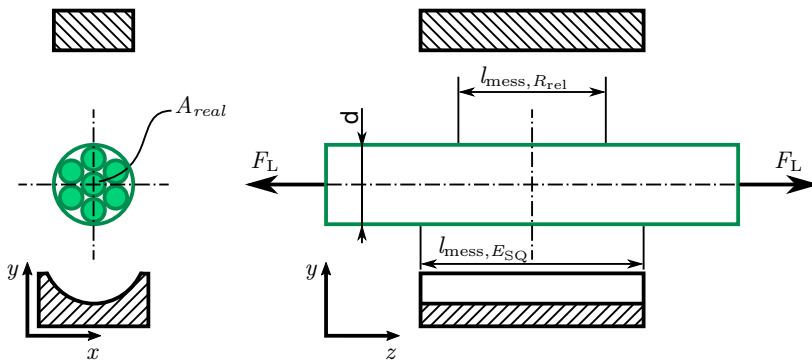


Abb. 3.45: Messbereich Seilquerschnittsmessung im Querdruckversuch

Durch die Messung der Seilquerschnitte unter reiner Zugkraft und nach der Aufbringung der höchsten Querkraft (vgl. Tab. 3.6) kann die irreversible Deformation in Abhängigkeit der Querkraft bewertet werden. Die Abb. 3.47 bis 3.49 zeigen für die untersuchten Seile die Veränderung der extremen Durchmesser. Für die Darstellung wird die Seilkraft in Bezug auf die MBF als Seilkraftfaktor

$$f_L = \frac{F_L}{MBF} \quad (3.38)$$

angegeben.

In Abb. 3.46 kann das Draht- mit dem Faserseil verglichen werden. Für das Drahtseil ergibt sich keine auswertbare bleibende Veränderung der Durchmesser durch die Querkraft. Lediglich durch die Erhöhung der Seilkraft schnürt sich das Seil insgesamt zusammen. Dies zeigt sich durch die Reduktion aller dargestellten Durchmesser vor allem des Durchmessers, der aus der Fläche der konvexen Hülle berechnet wird. Der Unterschied zwischen den beiden extremen Durchmessern ist konstruktionsbedingt und dem Unterschied aus Messung über die Kuppen oder die Täler geschuldet (vgl. Abb. 2.11 und Abb. 3.25). Insgesamt zeigt sich keine nennenswerte irreversible Deformation.

Alle Faserseile zeigen demgegenüber eine zum Teil deutliche Veränderung der Durchmesser nach Aufbringung der Querkraft. Bei den Seilen 1.2 (Abb. 3.47b) und 1.4 (Abb. 3.48a) ist eine besonders deutliche Veränderung des Durchmessers erkennbar. Auch der Flächendurchmesser dieser Seile wird bereits bei einer geringen Seilkraft durch die Querkraft deutlich reduziert.

Die Seile 2.2 (Abb. 3.49a) und 2.3 (Abb. 3.49b) zeigen ebenfalls eine deutliche Veränderung der Durchmesser bei höheren Seilkräften durch die Querkraft. Dabei nimmt die Fläche des Querschnitts bei den höheren Seilkräften stärker ab. Der ähnliche Verlauf der beiden Seile ist bemerkenswert, da zwar der lasttragende Teil identisch konstruiert ist, aber Seil 2.3 mit einem zusätzlichen Mantel versehen ist.

Ein ähnliches Verhalten zeigen auch die Seile 1.1 (Abb. 3.47a) und 1.5 (Abb. 3.48b). Bei geringer Seilkraft ergeben sich durch die zusätzliche Querkraft kaum Unterschiede in den Durchmessern. Diese nehmen jedoch zu höheren Seilkräften hin zu. Diese beiden Seile weisen hinsichtlich des zusätzlichen Kerns eine identische Konstruktion auf. Der zusätzliche Mantel im Fall von Seil 1.1 hat an dieser Stelle offenbar keinen wesentlichen Einfluss.

Bei Seil 1.3 (Abb. 3.46a) fällt auf, dass sich der maximale Durchmesser nur geringfügig ändert. Der minimale Durchmesser verhält sich unter zunehmender Seilkraft gepaart mit der entsprechenden Querkraft jedoch wie die anderen

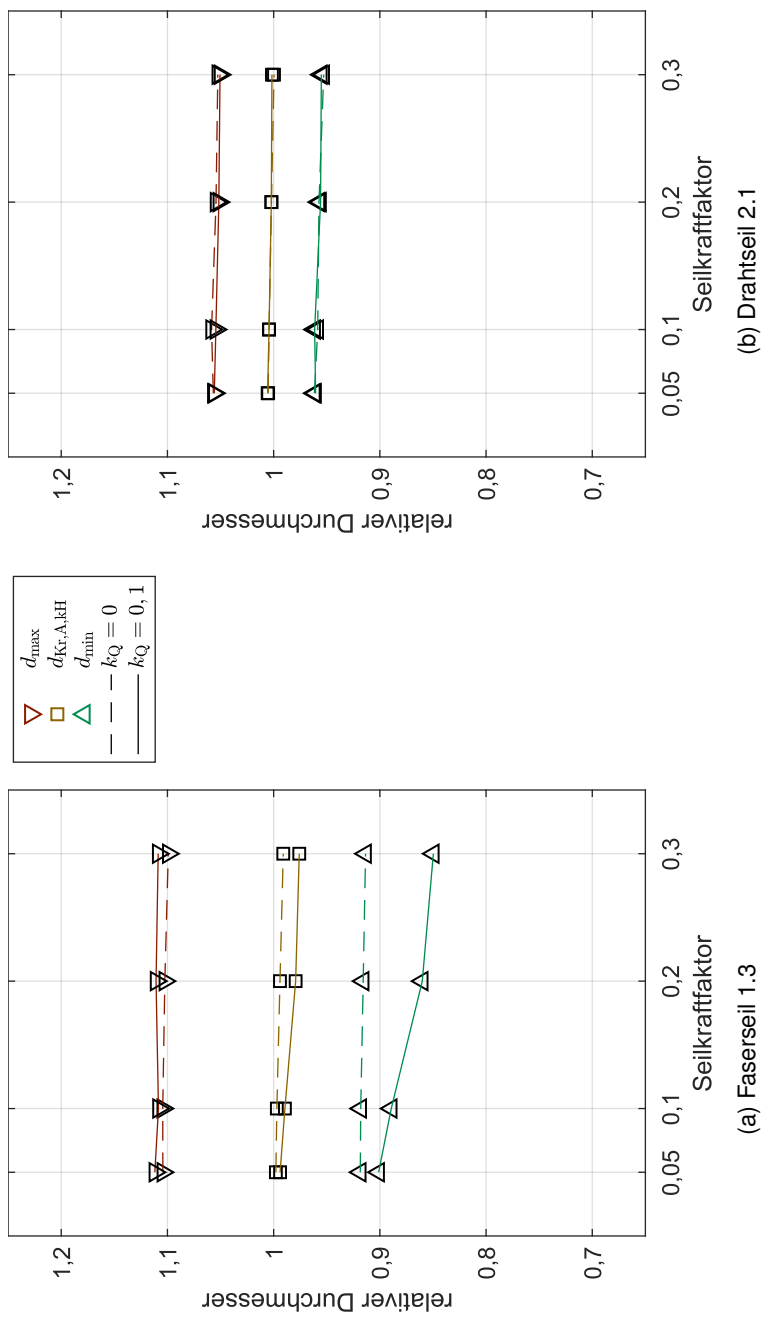


Abb. 3.46: Irreversible Veränderung der Seildurchmesser durch Aufbringung der Querkraft bei unterschiedlichen Seilkräften

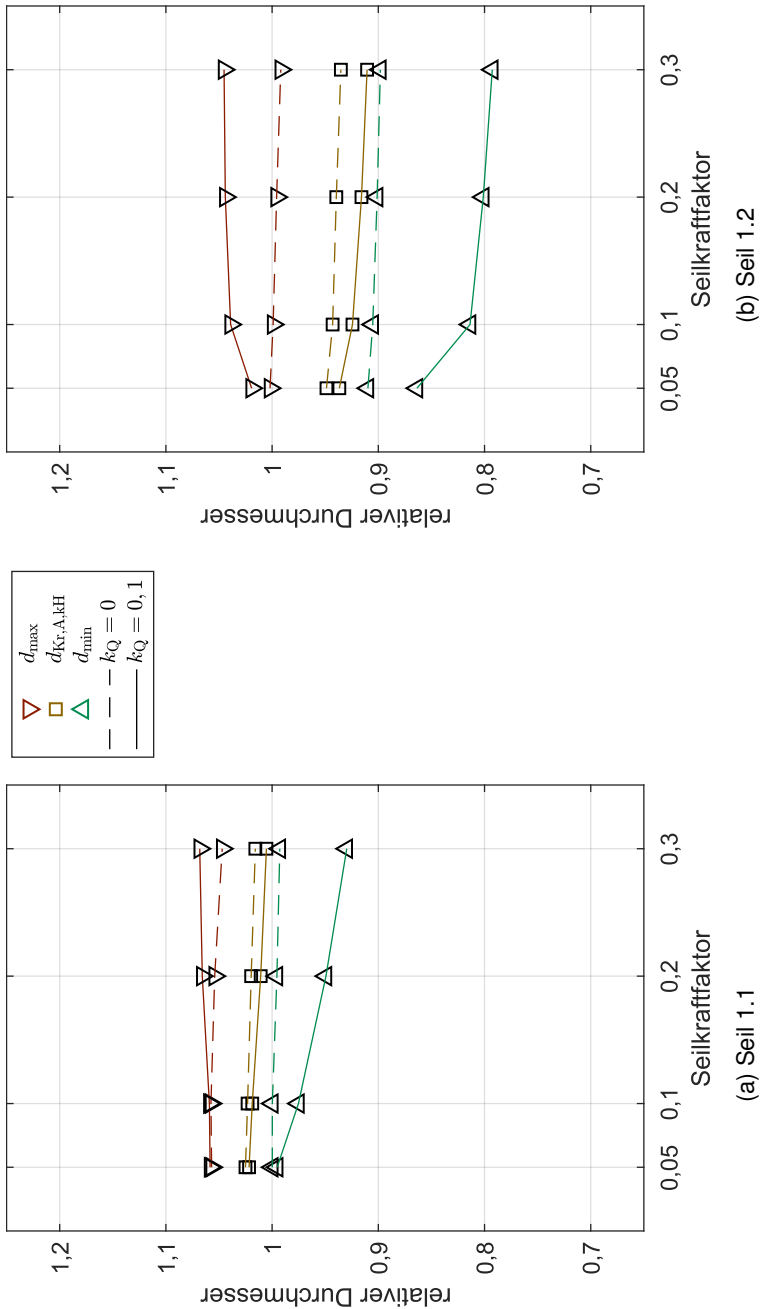


Abb. 3.47: Irreversible Veränderung der Seildurchmesser durch Aufbringung der Querkraft bei unterschiedlichen Seilkräften

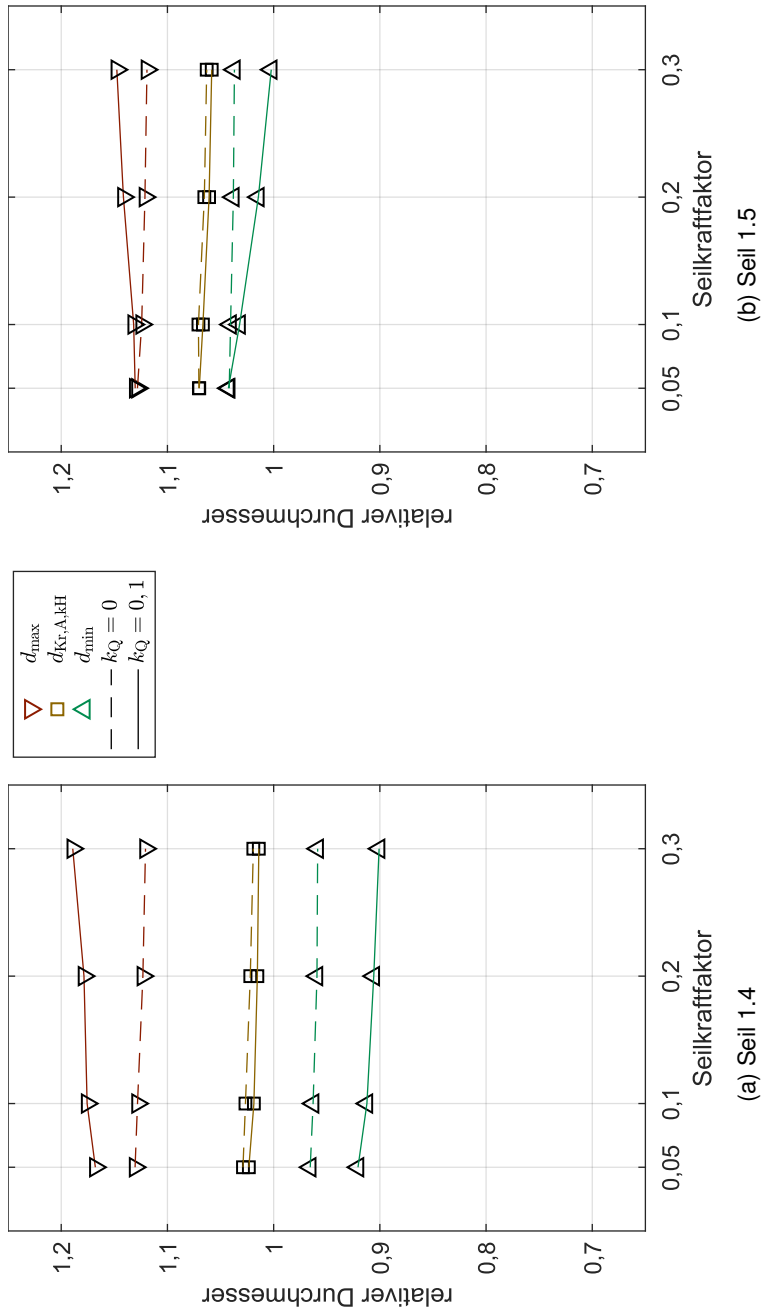


Abb. 3.48: Irreversible Veränderung der Seildurchmesser durch Aufbringung der Querkraft bei unterschiedlichen Seilkräften

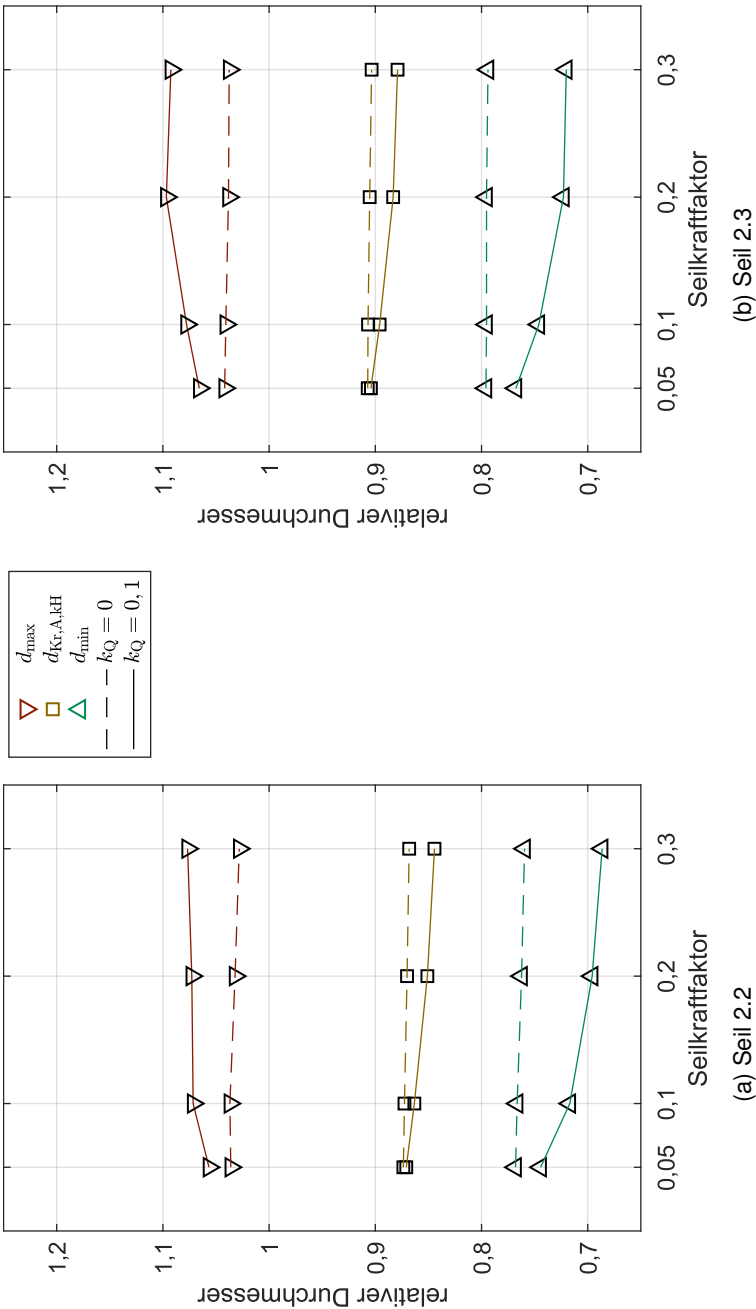


Abb. 3.49: Irreversible Veränderung der Seildurchmesser durch Aufbringung der Querkraft bei unterschiedlichen Seilkräften

Faserseile auch.

Zur weiteren Verarbeitung der Ergebnisse können diese in Abhängigkeit der unterschiedlichen Belastungen nach Seilkraft und Querspannungsverhältnis dargestellt werden. Dazu wird eine Oberflächenanpassung für die Parameter Seildurchmesser und relative Rundheit nach dem Modell

$$\begin{aligned} f(f_L, k_Q) = & p_{00} + p_{10} \cdot f_L + p_{01} \cdot k_Q + p_{20} \cdot f_L^2 + p_{11} \cdot f_L \cdot k_Q + p_{02} \cdot k_Q^2 \\ & + p_{30} \cdot f_L^3 + p_{21} \cdot f_L^2 \cdot k_Q + p_{12} \cdot f_L \cdot k_Q^2 + p_{03} \cdot k_Q^3 + p_{40} \cdot f_L^4 \\ & + p_{31} \cdot f_L^3 \cdot k_Q + p_{22} \cdot f_L^2 \cdot k_Q^2 + p_{13} \cdot f_L \cdot k_Q^3 + p_{04} \cdot k_Q^4 \end{aligned} \quad (3.39)$$

durchgeführt.

Das Verhalten der Seile ist dabei wie bereits beschrieben. In dieser Darstellung ist lediglich die Abhängigkeit von der Seil- und der Querkraft detaillierter dargestellt. Die Ergebnisse der Durchmesserermittlung der weiteren Seile sind im Anhang in Kapitel A.1 dargestellt.

Die aus den Durchmessern berechnete relative Rundheit ist zusammen mit der angepassten Fläche in Abb. 3.51 zu sehen. Entsprechend der relativ konstanten extremen Seildurchmesser ergibt sich für das Drahtseil 2.1 eine annähernd konstante relative Rundheit. Das Faserseil 1.3 zeigt demgegenüber eine deutliche irreversible Deformation in Abhängigkeit der Seil- und Querkraft. Die Deformation aufgrund reiner Seilkraft (Abb. 3.51a $k_Q = 0$) ist dabei geringer als bei der Kombination mit einer Querkraft.

Die Darstellung der Ergebnisse der relativen Rundheit im Querdrukversuch der übrigen Seile ist im Anhang in Kapitel A.2 zu finden.

In Abb. 3.52 und 3.53 sind die Kennwerte der Seile der Querdrukversuche zusammengefasst. Im Vergleich zu den Kennwerten aus den Wickelversuchen (vgl. Abb. 3.40 und 3.41) streuen die Werte deutlich stärker. Anhand der Streuung der Werte kann abgelesen werden wie empfindlich oder unempfindlich ein Seil gegen eine Variation der Seilkraft und Querkraft ist.

Der Grund für die stärkere Streuung der Werte in den Querdrukversuchen ist auf den größeren Umfang der untersuchten Betriebspunkte zurückzuführen.

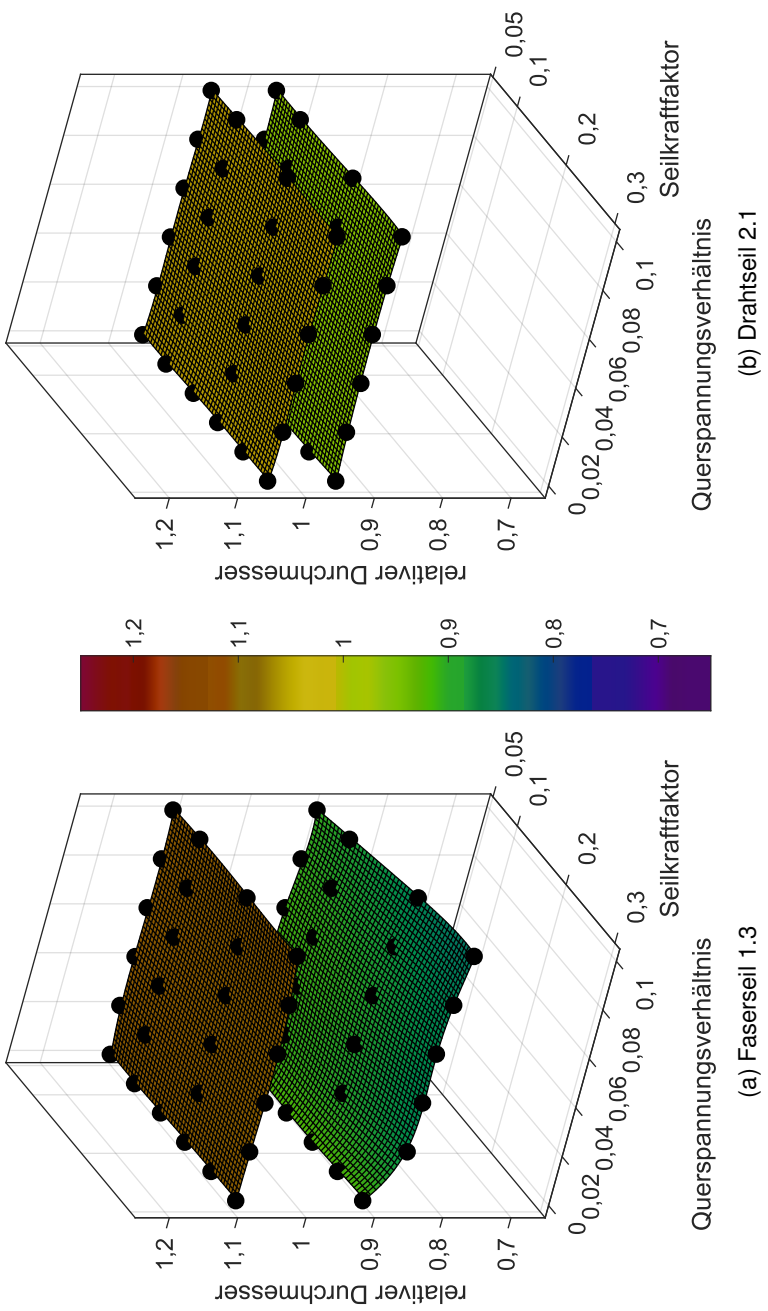


Abb. 3.50: Seildurchmesser d_{\max} und d_{\min} in Abhängigkeit der Seilkraft und des Querspannungsverhältnisses

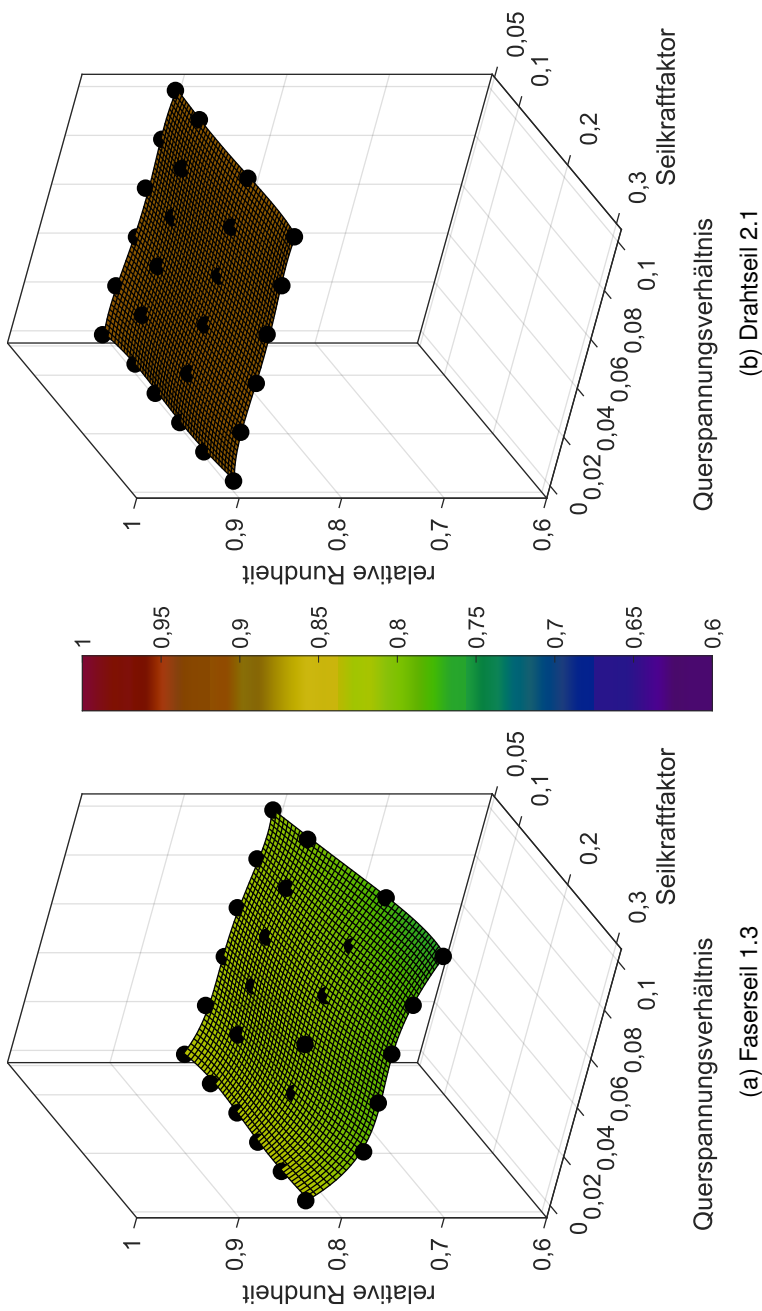


Abb. 3.51: Relative Rundheit R_{rel} in Abhängigkeit der Seilkraft und des Querschnittsverhältnisses

Während in den Wickelversuchen eine Seilkraft durch das mehrlagige Wickeln in Kombination mit verschiedenen Querkraften eines bestimmten Bereichs getestet wird, werden im Querdruckversuch alle Kombinationen nach Tab. 3.6 untersucht. Qualitativ gibt es eine gute Übereinstimmung zwischen den Werten.

In Abb. 3.52a ist noch einmal zu sehen, dass das Drahtseil 2.1 nahezu keine Veränderung der irreversiblen Deformation in den Querdruckversuchen hat. Die Faserseile haben eine zum Teil starke Variation der Durchmesser über das gesamte Experiment erfahren. Die Streuung der Vergleichsdurchmesser für Umfang und Fläche haben im Vergleich mit den maximalen und minimalen Durchmessern eine zum Teile erheblich geringere Streuung. Trotz einer Deformation behalten die Seilquerschnitte demzufolge eine annähernd gleiche Fläche und einen annähernd gleichen Umfang.

Die Ellipsität aller untersuchten Seile liegt meist im Bereich guter Übereinstimmung mit einer Ellipse. Lediglich die Flächenellipsität der Seile 1.4, 1.5 und 2.2 liegen im Bereich nur befriedigender Übereinstimmung Abb. 3.52b.

Im Vergleich zwischen relative Rundheit und Orthogonalität lässt sich auch in Fall der Querdruckversuche eine leichte negative Korrelation nachweisen. Diese fällt jedoch aufgrund der Streuung der Ergebnisse deutlich geringer im Vergleich zu den Wickelversuchen aus.

Bei der Beurteilung der Form anhand der Kennwerte Konvexität und Zirkularität (Abb. 3.53b) fällt das Drahtseil 2.1 auf. Aufgrund der stabilen Litzen hat es jeweils im Vergleich zu den Faserseilen niedrigere Werte. Die beiden ummantelten Seile (Seil 1.1 und Seil 2.3) haben im Gegensatz dazu hohe Werte für Konvexität und Zirkularität.

Nachdem eine gute beziehungsweise in einigen Fällen befriedigende Übereinstimmung der Seilquerschnitte mit einer Ellipse nachgewiesen werden kann, wird für die Seile der runde Ersatzdurchmesser nach Gleichung (3.31) und Gleichung (3.32) bestimmt. Die Anpassung der Funktionen ist in den Abb. 3.50 bis 3.57 zu sehen.

Neben den extremen Durchmessern ist auch der Durchmesser der Fläche der konvexen Hülle dargestellt. Im Vergleich dieser Werte mit dem Vergleichsdurchmesser der Fläche einer Ellipse (Gleichung (3.33)) sieht man die Über-

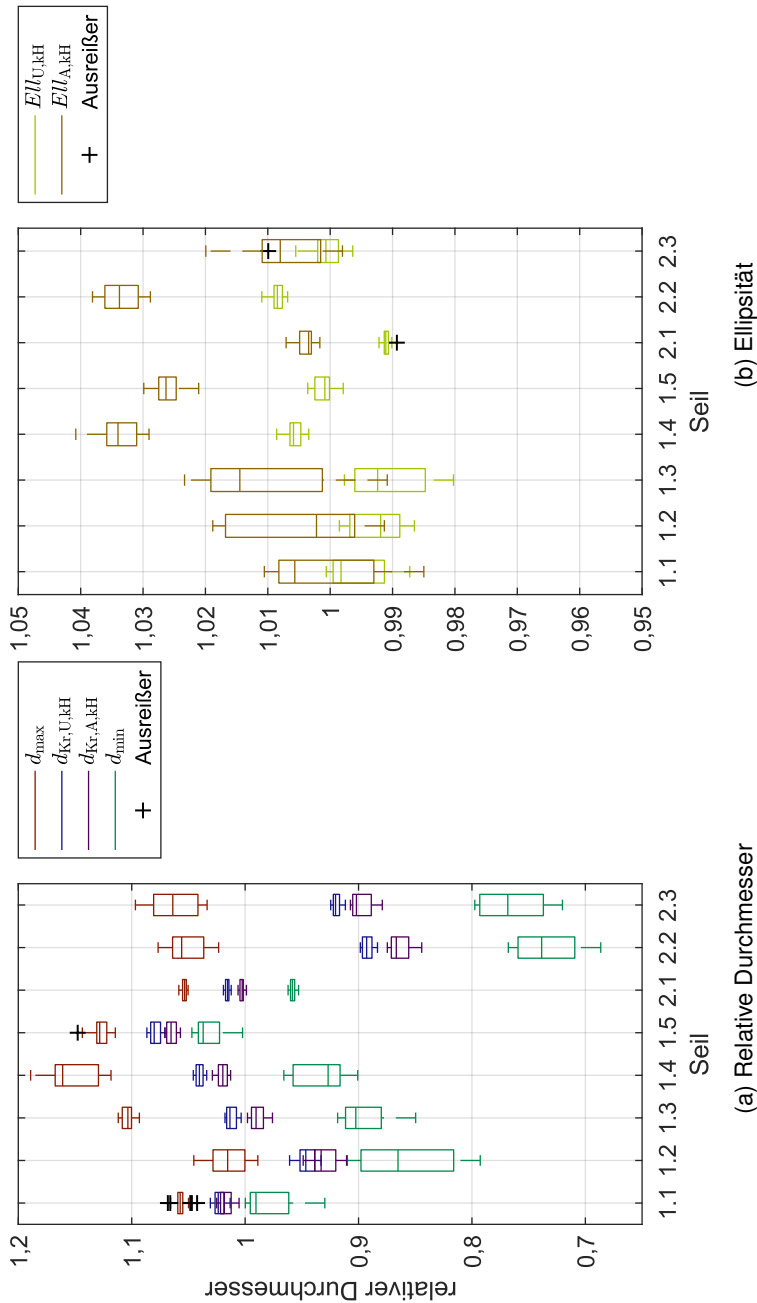
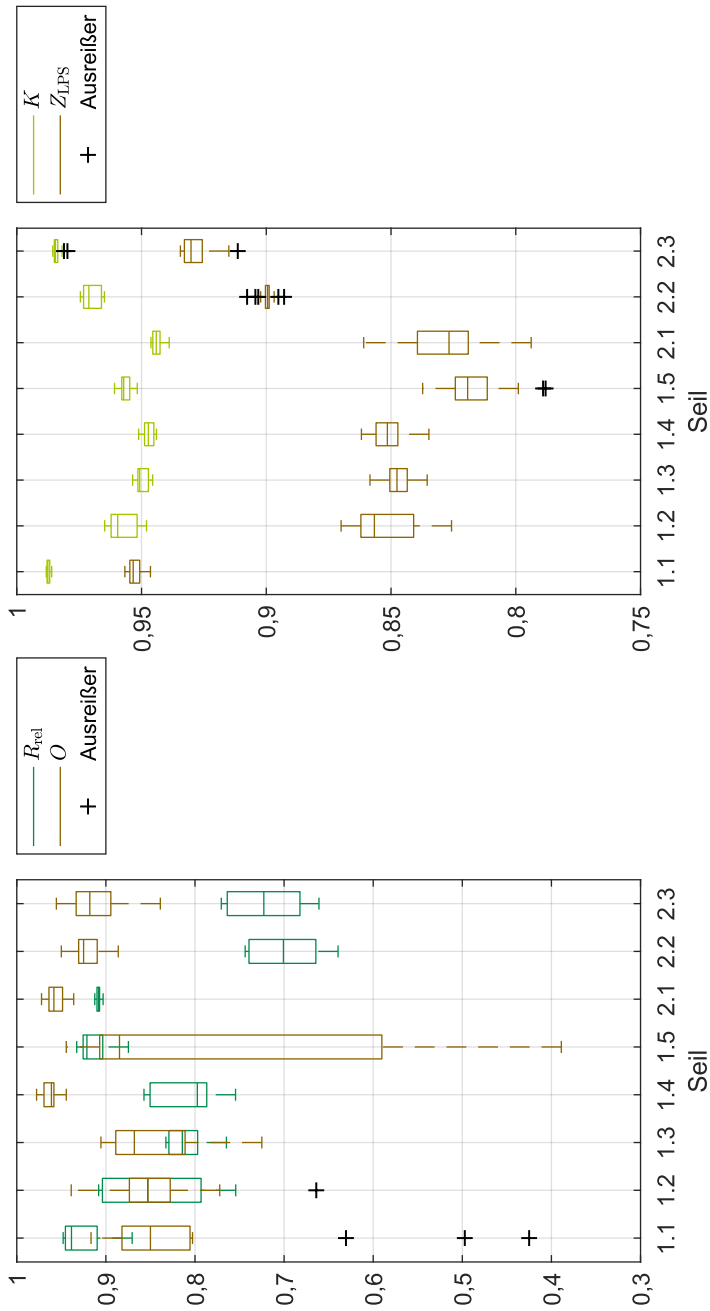


Abb. 3.52: Ergebnisse zum Seilquerschnitt der Querdrukversuche



(a) Relative Rundheit und Orthogonalität

(b) Konvexität und Zirkularität

Abb. 3.53: Ergebnisse zum Seilquerschnitt der Querdruckversuche

einstimmung mit der Flächenellipsität.

In den Darstellungen kann das Deformationsverhalten der Seile unter dem breiten Spektrum der Betriebspunkte nach Tab. 3.6 einfach abgelesen werden. Zum einen wird die relative Rundheit charakterisiert. Dabei sind die Lage und die Verteilung der Werte erkennbar. Zum anderen wird das Verhalten der extremen Durchmesser in Abhängigkeit der relativen Rundheit deutlich.

Für das Drahtseil kann auch hier der kleine Bereich der relativen Rundheit abgelesen werden. Die Seile 1.1 und 1.5 weisen neben ihrer hohen relativen Rundheit auch einen im Vergleich zu den anderen Faserseilen kleinen Bereich der Streuung auf.

Die Abnahme der Fläche im Laufe der irreversiblen Deformation ist bei fast allen Seilen zu sehen. Lediglich Seil 1.4 zeigt eine konstante Fläche wie theoretisch in Kapitel 3.2.3 beschrieben (Abb. 3.56a). Seil 1.5 verhält sich im Gegensatz zu den anderen Seilen sogar so, dass die Fläche mit zunehmender Deformation zunimmt (Abb. 3.56b). Dies ist jedoch nicht so ausgeprägt, wie es anhand der Berechnung aus den extremen Durchmessern den Anschein hat. Der Flächendurchmesser der konvexen Hülle zeigt lediglich eine geringe Zunahme. Die Abweichung ist auch an dem etwas erhöhten Werte der Flächenellipsität erkennbar.

Die Ergebnisse zur relativen Rundheit und dem Flächenverhalten der Seile zu den Abb. 3.50 bis Abb. 3.57 sind in Tab. 3.7 gegeben (vgl. Gleichung (3.31) bis (3.33)).

Tab. 3.7: Parameter Seilquerschnitt im Querdruckversuch

Seil	$d_{r,rel}$	a_{max}	a_{min}	a_F
1.1	1,04	-0,21	0,79	0,59
1.2	0,97	-0,27	0,73	0,47
1.3	1,07	-0,14	0,85	0,71
1.4	1,04	-0,47	0,53	0,06
1.5	1,06	-0,67	0,33	-0,34
2.1	1,02	-0,29	0,71	0,42
2.2	0,93	-0,35	0,65	0,30
2.3	0,95	-0,34	0,66	0,32

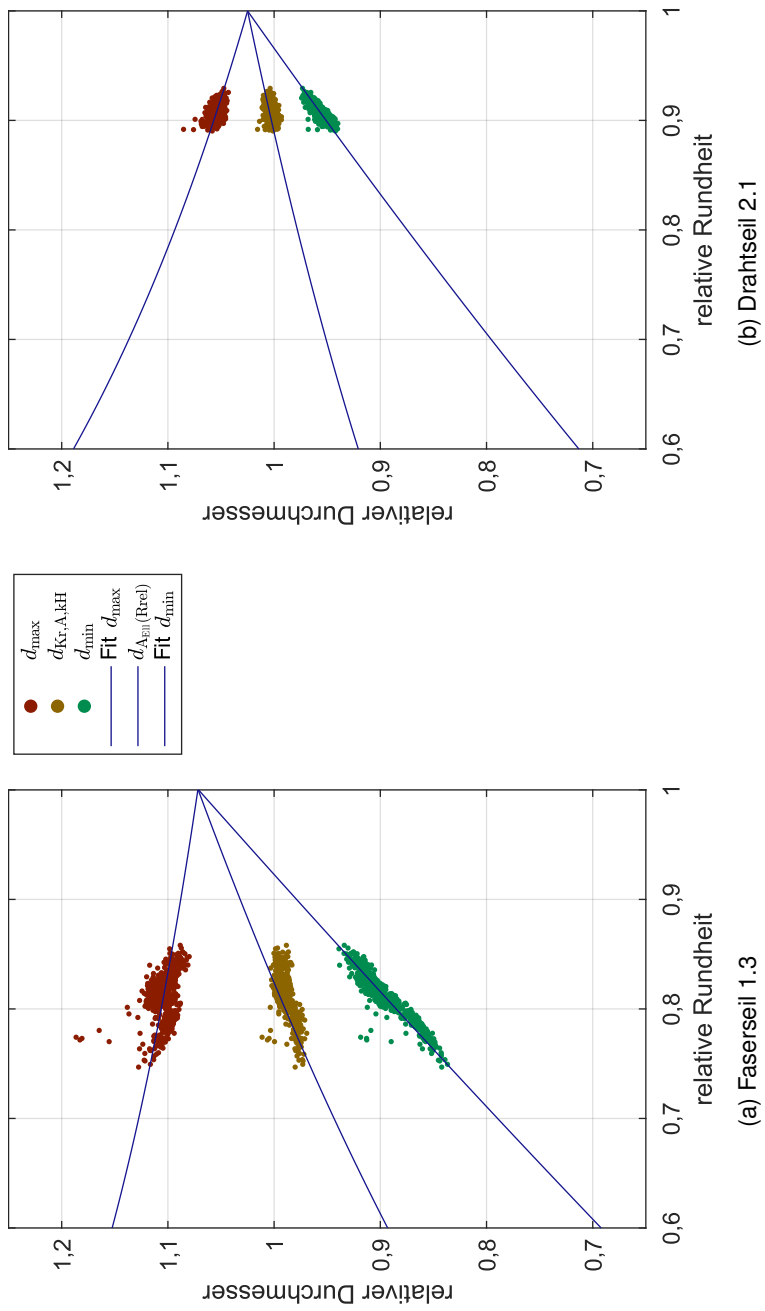


Abb. 3.54: Abhängigkeit von maximalem und minimalem Durchmesser von der relativen Rundheit im Querdruckversuch

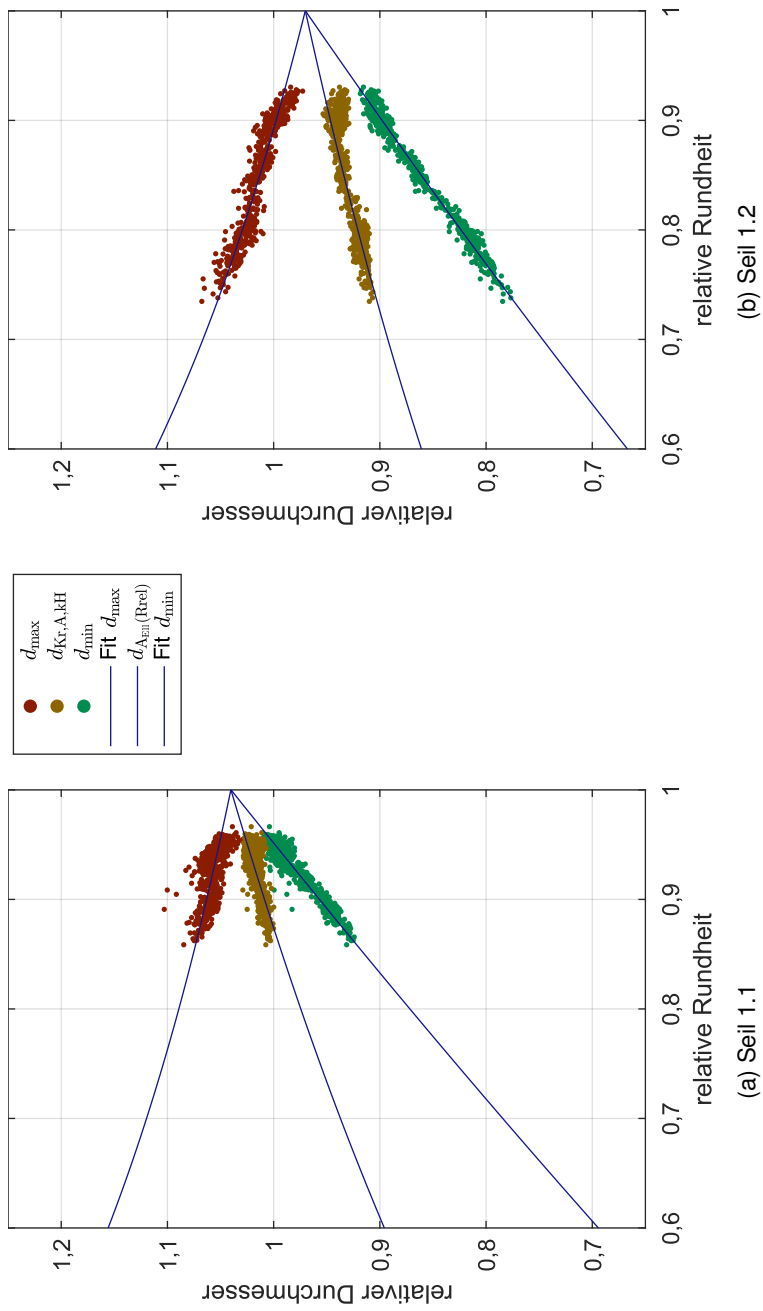


Abb. 3.55: Abhängigkeit von maximalem und minimalem Durchmesser von der relativen Rundheit im Querdruckversuch

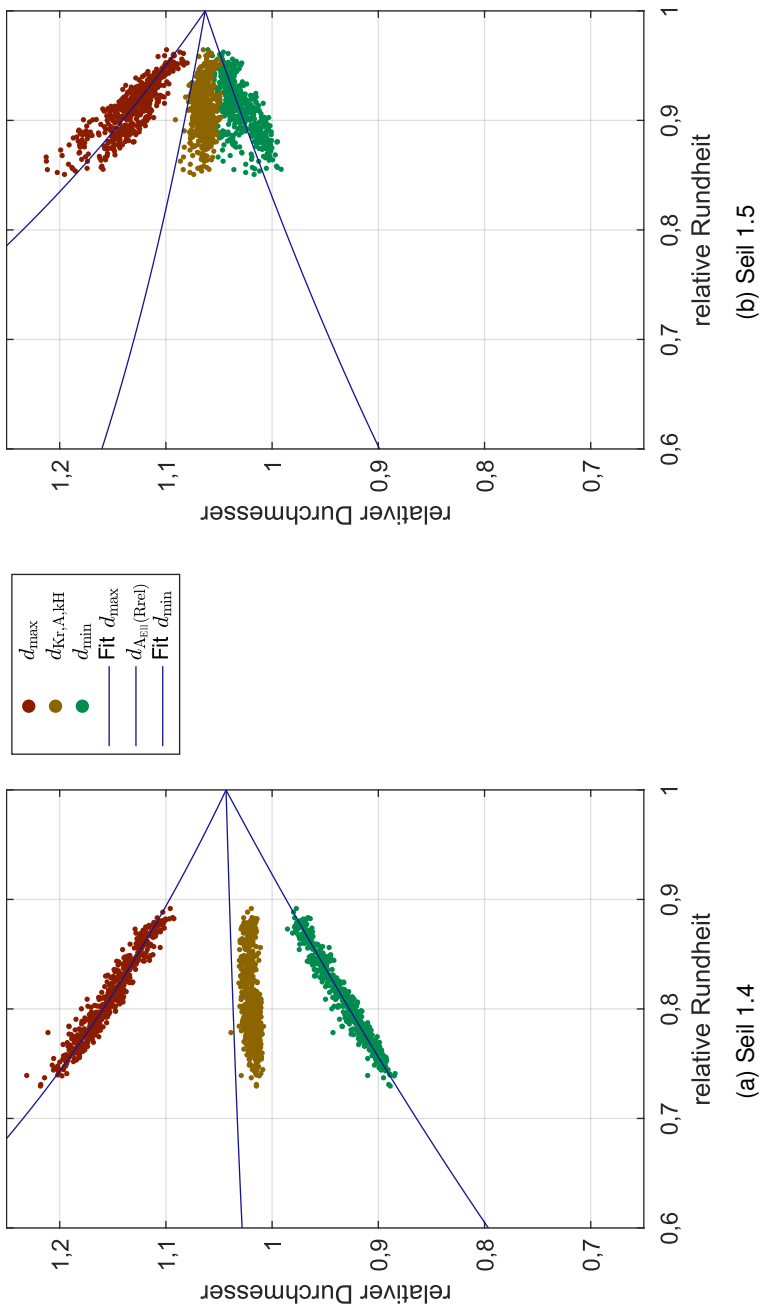


Abb. 3.56: Abhängigkeit von maximalem und minimalem Durchmesser von der relativen Rundheit im Querdruckversuch

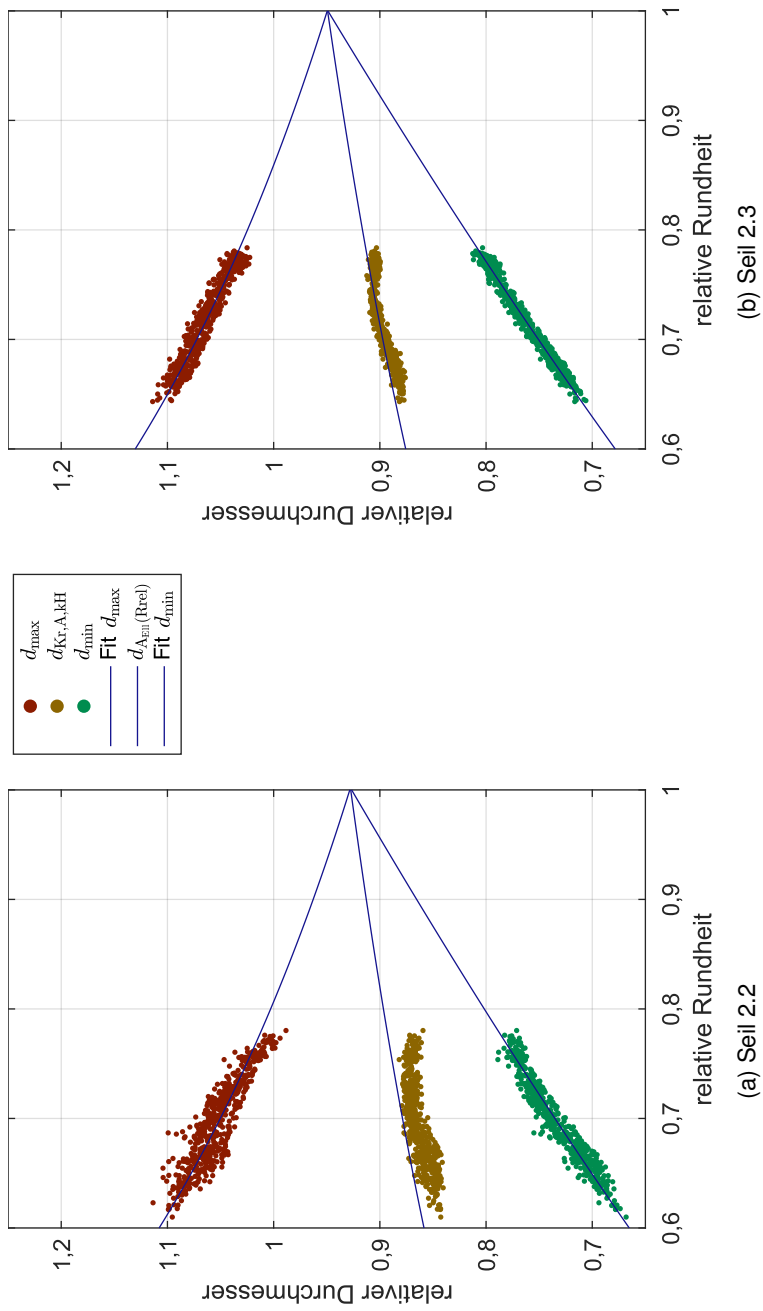


Abb. 3.57: Abhängigkeit von maximalem und minimalem Durchmesser von der relativen Rundheit im Querdruckversuch

3.3.2 Querelastizitätsmodul – Auswertung

Der Aufbau des Versuchs ist wie in Kapitel 3.3 beschrieben. Die Belastung des Seils wird wie in Tab. 3.6 angegeben durchgeführt.

Während der zyklischen Aufbringung der Querkraft wird kontinuierlich die Querkraft und der Weg der Durchmesserreduzierung zur späteren Berechnung des Querelastizitätsmoduls aufgezeichnet (Abb. 3.58a). Der Zusammenhang von Kraft und Deformation ist in Abb. 3.58b dargestellt.

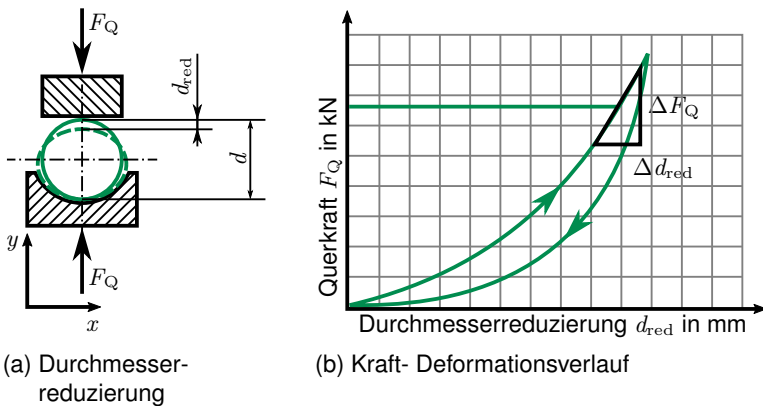


Abb. 3.58: Ermittlung des Querelastizitätsmoduls im Querdruckversuch

Die Kurve der Be- und Entlastung weist eine Hysterese auf. Die eingeschlossene Fläche entspricht der Verlustarbeit durch die innere Reibung im Seil.

Der Querelastizitätsmodul

$$E_{SQ} = \frac{\sigma_Q}{\varepsilon_Q} = \frac{\frac{F_Q}{s \cdot l_{\text{mess}}}}{\frac{d_{\text{red}}}{s}} \quad (3.40)$$

berechnet sich aus dem Verhältnis von Querspannung und Querdehnung. In Abb. 3.58b ist neben dem Kraft- Deformationsverlauf zu sehen wie ein Sekantenmodul

$$E_{SQ, Sek} = \frac{\Delta F_Q}{\Delta d_{red} \cdot l_{mess, ESQ}}, \quad (3.41)$$

für eine bestimmte Querkraft berechnet wird.

3.3.3 Querelastizitätsmodul – Ergebnisse

Mithilfe der Gleichung (3.41) wird der Querelastizitätsmodul paarweise für benachbarte gemessene Werte von Querkraft und Durchmesserreduzierung berechnet. Für eine konstante Seilkraft von $F_L = 0,05 \cdot \text{MBF}$ sind die Ergebnisse der kontinuierlichen Auswertung und einer angepassten Funktion in Abb. 3.59 angegeben.

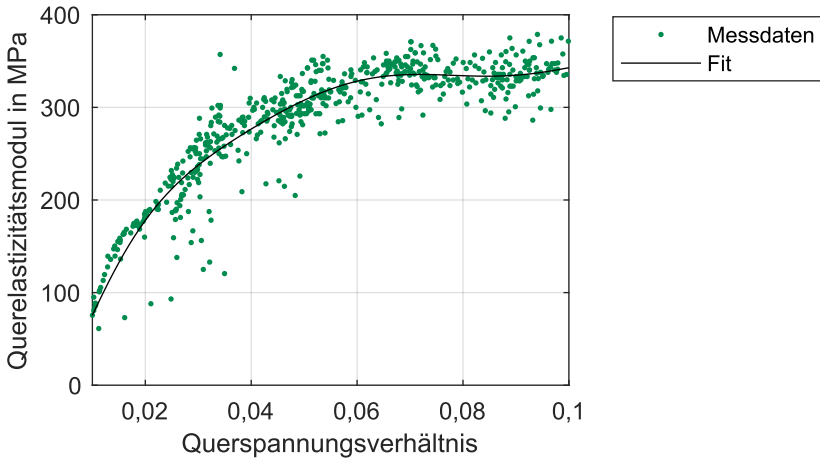


Abb. 3.59: Querelastizitätsmodul für konstante Seilkraft $F_L = 0,05 \cdot \text{MBF}$ mit Messwerten und angepasster Funktion für Seil 1.3

Analog dazu wird eine Fläche nach dem Modell

$$\begin{aligned}
 E_{SQ}(f_L, k_Q) = & p_{00} + p_{10} \cdot f_L + p_{01} \cdot k_Q + p_{20} \cdot f_L^2 + p_{11} \cdot f_L \cdot k_Q + p_{02} \cdot k_Q^2 \\
 & + p_{30} \cdot f_L^3 + p_{21} \cdot f_L^2 \cdot k_Q + p_{12} \cdot f_L \cdot k_Q^2 + p_{03} \cdot k_Q^3 \\
 & + p_{31} \cdot f_L^3 \cdot k_Q + p_{22} \cdot f_L^2 \cdot k_Q^2 + p_{13} \cdot f_L \cdot k_Q^3 + p_{04} \cdot k_Q^4 \\
 & + p_{32} \cdot f_L^3 \cdot k_Q^2 + p_{23} \cdot f_L^2 \cdot k_Q^3 + p_{14} \cdot f_L \cdot k_Q^4 + p_{05} \cdot k_Q^5 \quad (3.42)
 \end{aligned}$$

an die Messwerte in Abhängigkeit des Seilkraftfaktors und des Querspannungsverhältnisses angepasst.

Aufgrund der verschieden hohen Querelastizitätsmoduln der untersuchten Sei-

le werden diese in drei verschiedenen Zusammenstellungen mit jeweils gleich skalierten Achsen dargestellt.

Die Seile 1.2 bis 1.5 mit einem Querelastizitätsmodul unter 800 MPa sind zuerst abgebildet. Die Seile 1.1, 2.2 und 2.3 liegen mit ihren Querelastizitätsmoduln bis zu einem Höchstwert von 1500 MPa. Das Drahtseil 2.1 hat wie erwartet den höchsten Maximalwert der Querelastizitätsmoduln von 2500 MPa.

Neben der absoluten Höhe der Querelastizitätsmoduln unterscheiden sich die Seile auch im Verlauf derselben. Im Bereich der kleinen Querspannungsverhältnisse zeigen die Seile ein mehr oder weniger ausgeprägten steilen Anstieg des Querelastizitätsmoduls (vgl. Abb. 3.59). Bei den Seilen 1.2, 1.3, 1.5, 2.2 und 2.3 folgt darauf zumindest zeitweise ein ungefähr konstanter Verlauf bei Erhöhung des Querspannungsverhältnisses. Im Fall von Seil 1.1 erfolgt zu Beginn ein derart starker Anstieg, dass im weiteren Verlauf der Querelastizitätsmodul noch einmal abnimmt. In Richtung der höchsten Querspannungsverhältnisse gibt es qualitativ zwei unterschiedliche Verhalten. Eine eindeutig degressive Zunahme der Querelastizitätsmoduln bei hohen Querspannungsverhältnissen haben die Seile 1.1, 1.5 und 2.1. Eindeutig progressiv verhalten sich die Querelastizitätsmoduln der Seile 1.2 und 2.3. Die weiteren Seile 1.3, 1.4 und 2.2 verlaufen bis kurz vor Ende des untersuchten Querspannungsbereichs progressiv und zum Ende hin dann degressiv. Insgesamt kann keine Abhängigkeit des Verlaufs der untersuchten Seile von den bekannten Konstruktionsmerkmalen festgestellt werden.

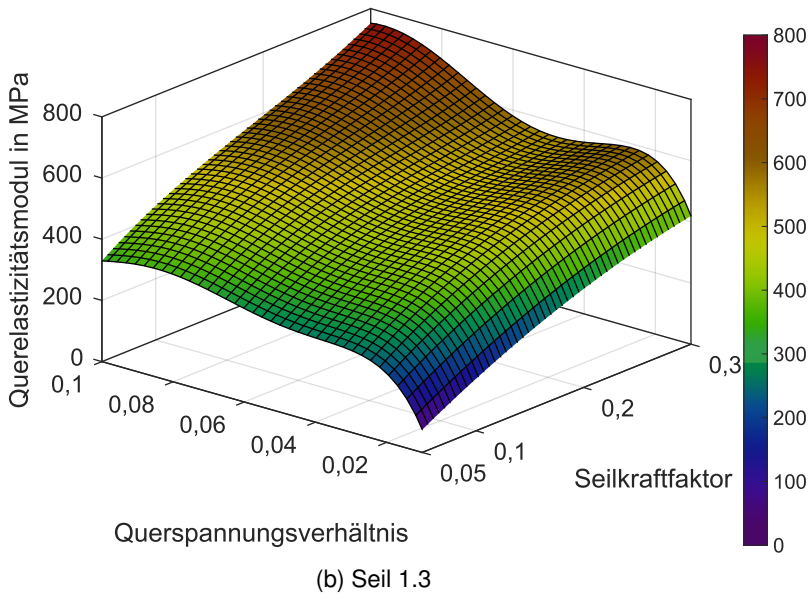
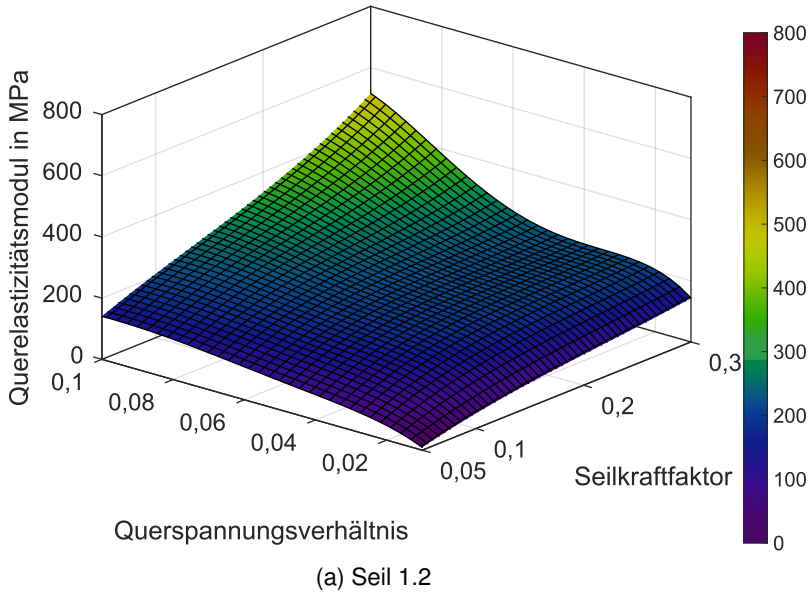


Abb. 3.60: Querelastizitätsmodul in Abhängigkeit von Seilkraftfaktor und Querspannungsverhältnis

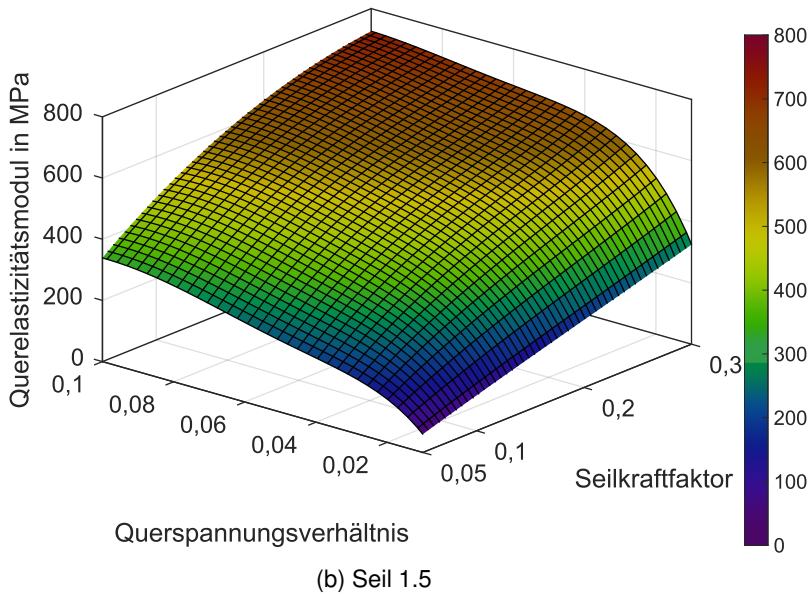
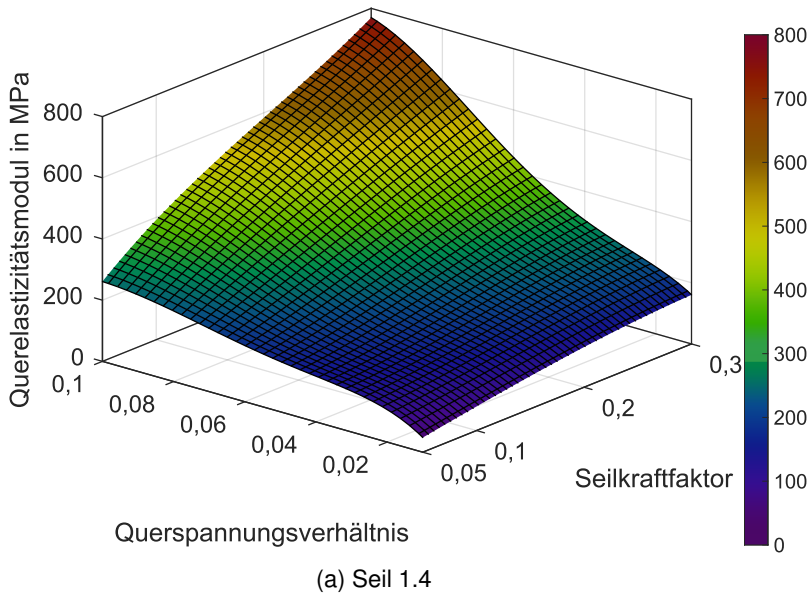


Abb. 3.61: Querelastizitätsmodul in Abhängigkeit von Seilkraftfaktor und Querspannungsverhältnis

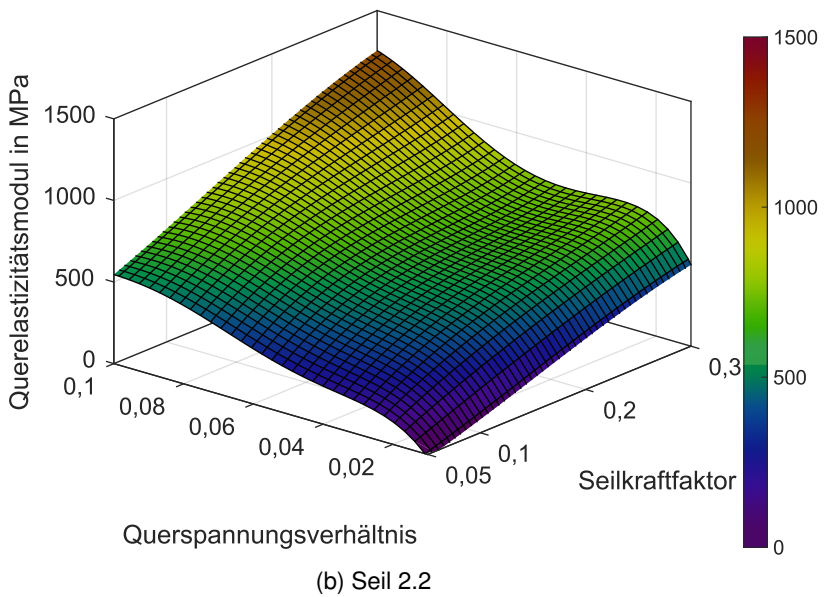
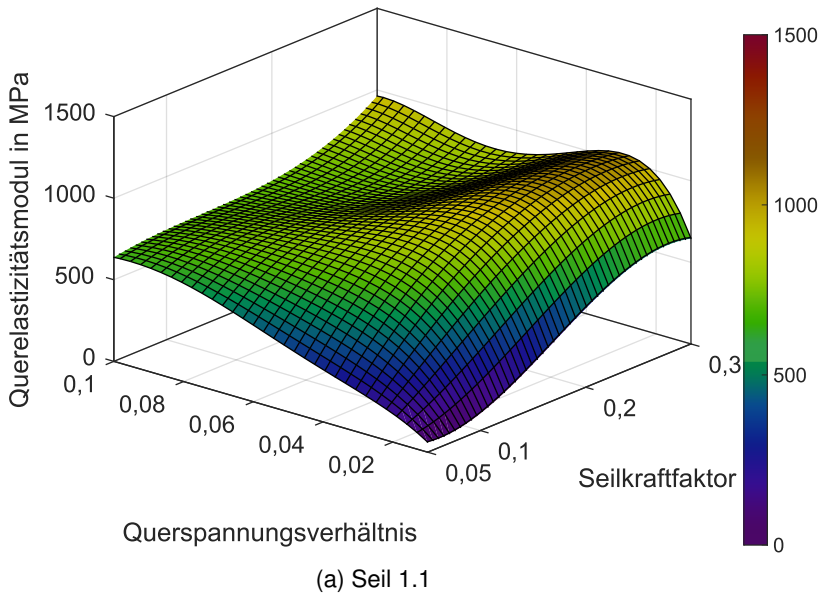


Abb. 3.62: Querelastizitätsmodul in Abhängigkeit von Seilkraftfaktor und Querspannungsverhältnis

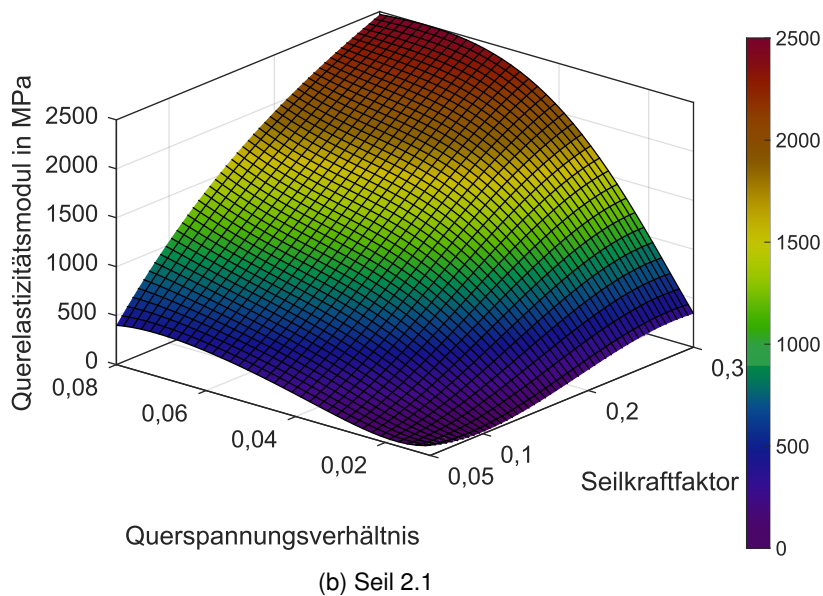
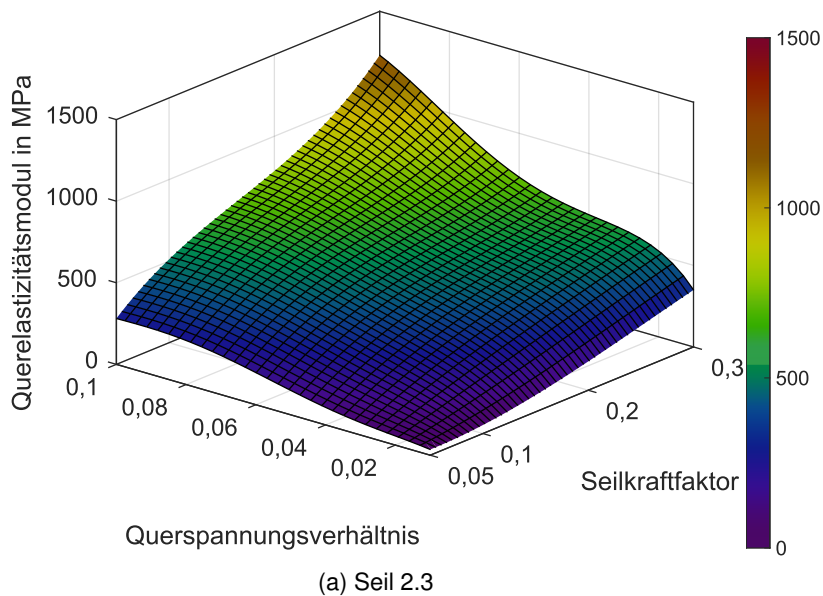


Abb. 3.63: Querelastizitätsmodul in Abhängigkeit von Seilkraftfaktor und Querspannungsverhältnis

3.4 Vergleich experimenteller Ergebnisse

Um die Eignung des vereinfachten Querdruckversuchs zu überprüfen, wird die irreversible Deformation der Seilquerschnitte aus den Wickel- und Querdruckversuchen verglichen. Aus den Querdruckversuchen wird die relative Rundheit der Seile für den mit den Wickelversuchen übereinstimmenden Seilkraftfaktor ausgewertet und über dem Querspannungsverhältnis aufgezeigt. Für die konstante Seilkraft reduziert sich die dreidimensionale Darstellung aus Abb. 3.51 damit auf zwei Dimensionen. Die relative Rundheit der Wickelversuche wird entsprechend dem Querspannungsverhältnis der jeweiligen Lage aufgetragen. Der Vergleich ist in Abb. 3.64 bis Abb. 3.69 zu sehen.

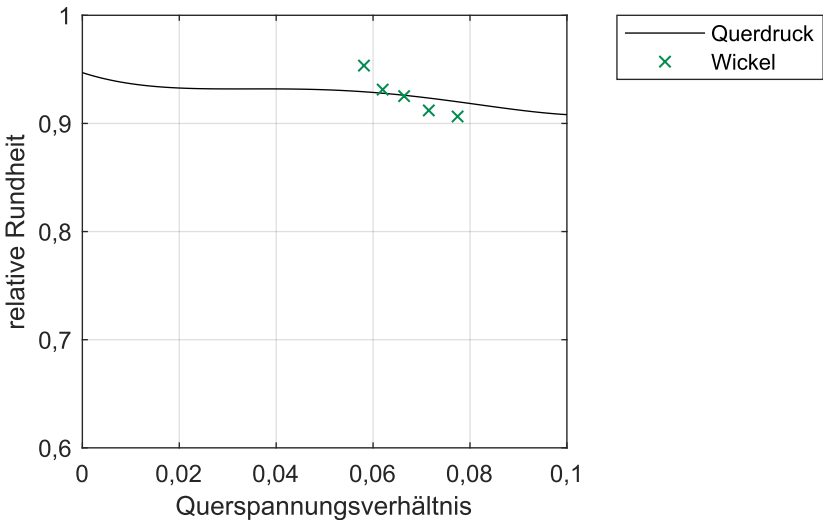


Abb. 3.64: Vergleich relative Rundheit Querdruck- und Wickelversuch Seil 1.1

Fast alle Seile zeigen in diesem Vergleich zumindest für einige Lagen eine sehr gute Übereinstimmung. Lediglich Seil 1.2 (Abb. 3.65) liegt im Wickelversuch mit der relativen Rundheit aller Lagen deutlich unter den aus dem Querdruckversuch erwarteten Werten. Eine besonders gute Übereinstimmung zeigt Seil 1.5. Auch in dieser Darstellung ist bei allen Seilen die bereits in Kapitel 3.2.4 (Abb. 3.39) beschriebene Variation der relativen Rundheit in Abhängigkeit der Lagen zu sehen.

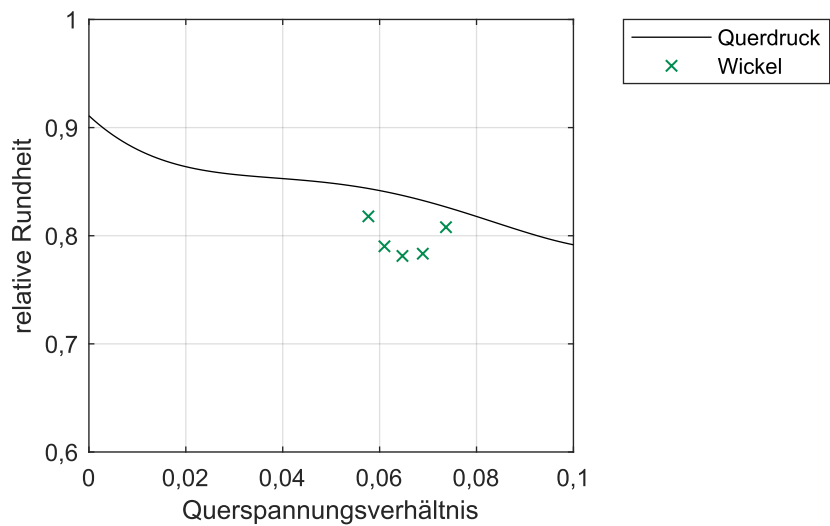


Abb. 3.65: Vergleich relative Rundheit Querdruck- und Wickelversuch Seil 1.2

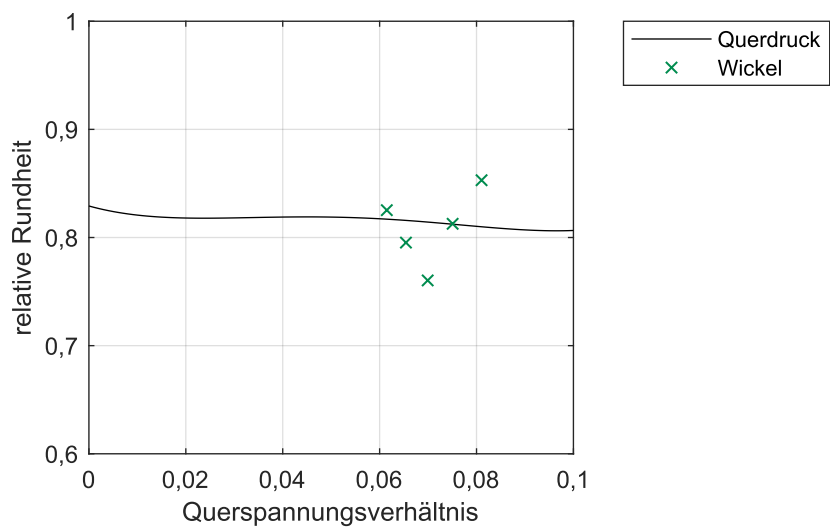


Abb. 3.66: Vergleich relative Rundheit Querdruck- und Wickelversuch Seil 1.3

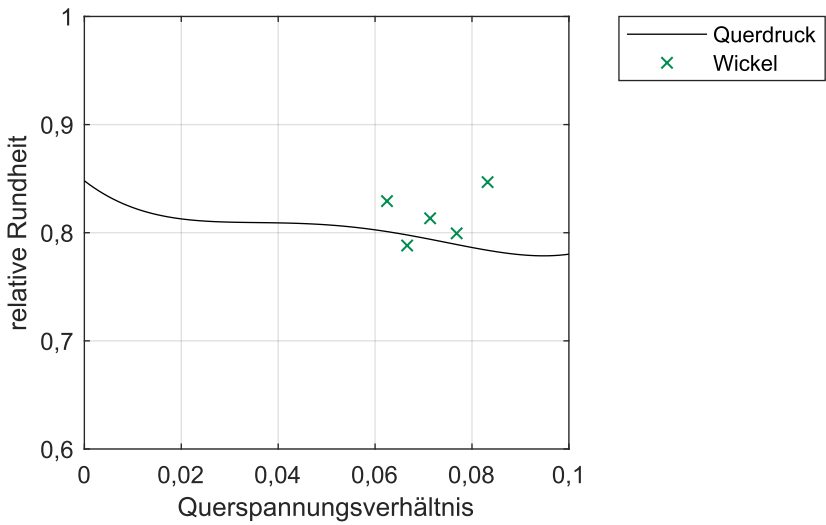


Abb. 3.67: Vergleich relative Rundheit Querdruck- und Wickelversuch Seil 1.4

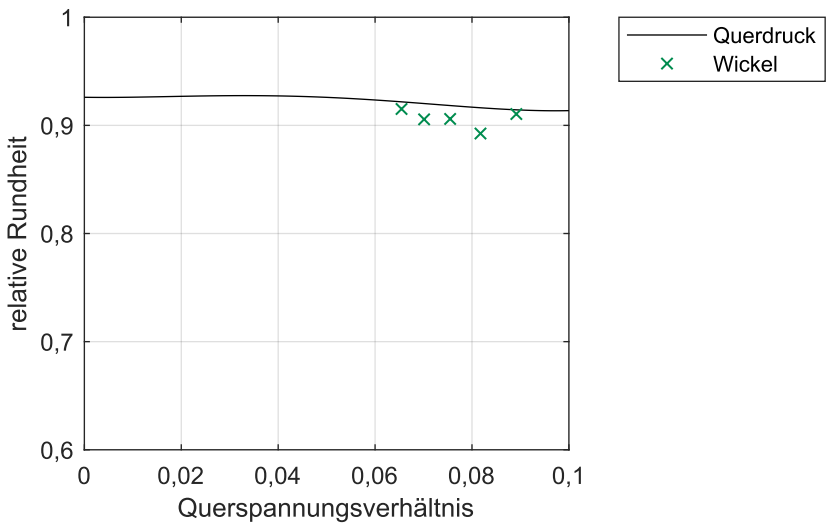


Abb. 3.68: Vergleich relative Rundheit Querdruck- und Wickelversuch Seil 1.5

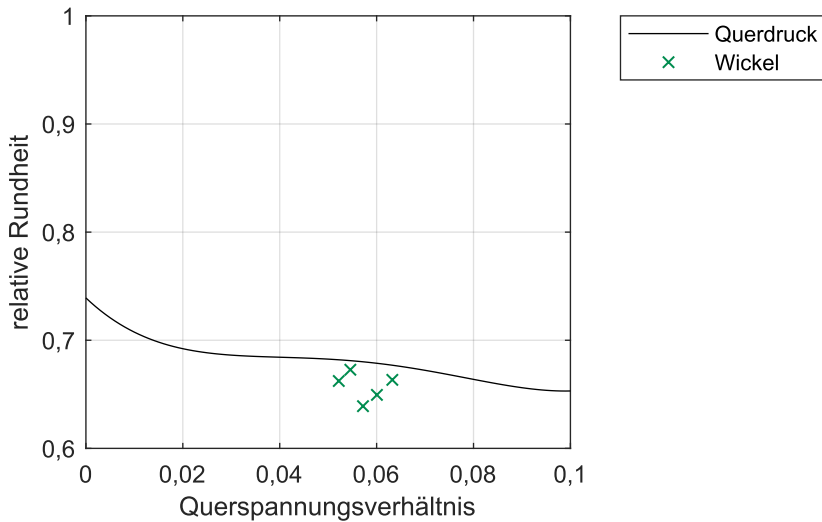


Abb. 3.69: Vergleich relative Rundheit Querdruck- und Wickelversuch Seil 2.2

Für die Seile 1.1, 1.3 und 1.4 liegen die im Querdruck vorhergesagten Werte für die relative Rundheit zwischen denen im Wickelversuch ermittelten. Für die übrigen Seile 1.2, 1.5 und 2.2 wird die relative Rundheit im Querdruckversuch überschätzt. Im Fall von Seil 1.5 allerdings nur sehr knapp.

Die Güte der Übereinstimmung ist in Abb. 3.70 angegeben.

Die Gründe für Abweichungen liegen im vereinfachten Aufbau des Querdruckversuchs. Hier wird der Kontakt der Seile untereinander nicht nachgebildet, um die gewünschte Vereinfachung zu bewirken. Auch wird zwischen PB und KB nicht unterschieden.

Abschließend werden die irreversible und die reversible Deformation verglichen. Für die relative Rundheit liegen die Werte direkt aus der Messung vor. Der Querelastizitätsmodul wird entsprechend Gleichung (3.42) für die Tab. 3.6 ausgewertet. Im Vergleich kann keine Korrelation zwischen irreversibler und reversibler Deformation gefunden werden.

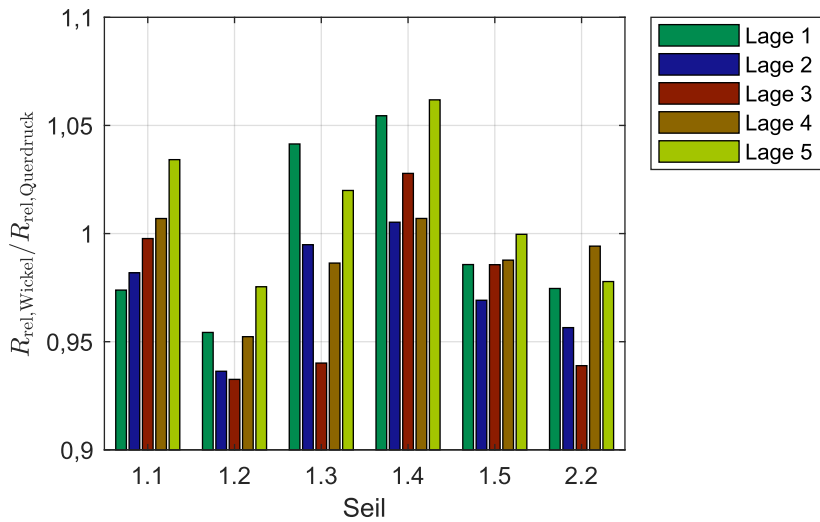


Abb. 3.70: Beurteilung des Vergleichs relative Rundheit Querdruk- und Wickelversuch

3.5 Experimentelle Untersuchungen – Zusammenfassung und Bewertung

In diesem Kapitel wurde die Analyse des Wickelpakets und der Seilquerschnitte beschrieben. Sowohl für das Wickelpaket als auch für die Querschnitte ergeben sich erhebliche Unterschiede für die verschiedenen Faserseile und das Drahtseil. Dies bestätigt die Notwendigkeit, das Verhalten der Seildeformation zu untersuchen, um es in der späteren Anwendung vor allem in der Mehrlagenwicklung berücksichtigen zu können.

Die gute Übereinstimmung der irreversiblen Deformation der Seilquerschnitte im Wickelversuch und im vereinfachten Querdruckversuch im untersuchten Parameterbereich lassen eine Anwendung in der folgenden Berechnung zu. Damit ist es möglich, eine große Breite an Betriebspunkten eines Seils vereinfacht zu untersuchen. Der Aufwand für den realitätsnahen aber sehr aufwendigen Wickelversuch kann daher reduziert werden.

Die Darstellung der relativen Rundheit in Abhängigkeit von der Seilkraft und vom Querspannungsverhältnis ermöglicht die spätere Berechnung der irreversiblen Deformation für verschiedene Betriebspunkte (Gleichung (3.39)). Über die Kennwerte des runden Vergleichsdurchmessers und der Flächenexponenten können mit der ermittelten relativen Rundheit die Ausdehnungen der extremen Durchmesser berechnet werden (Gleichung (3.31) und Gleichung (3.32)).

4 Wickelpaketberechnung

In diesem Kapitel wird aufgezeigt, wie aus den in Kapitel 3 ermittelten Kennwerten des Seils der Aufbau des Wickelpaketes berechnet wird. Die Synthese erfolgt dazu in umgekehrter Reihenfolge zu Kapitel 3 und beginnt beim Seil und geht anschließend zum mehrlagigen Wickelpaket über.

Zuerst werden die verwendeten abstrahierten Seilquerschnitte beschrieben. Anschließend wird in einem ersten Schritt ein Modell mit sich nicht deformierenden Ellipsen als Seilquerschnitt vorgestellt [SLW18]. Dieses wird in einem zweiten Schritt um die Deformation des Querschnitts erweitert. Die Ergebnisse werden abschließend verglichen.

4.1 Seilquerschnittsdeformation

Die in den durchgeführten Experimenten untersuchten Seile haben meist eine gute und zum Teil eine befriedigende Übereinstimmung mit einer Ellipse gezeigt (Kapitel 3.3.1). Daher wird für das Modell der deformierten Seilquerschnitte für die vorliegenden Seile eine Ellipse als idealisierter Ersatzquerschnitt verwendet. Bei Seilen anderer Herstellung bezüglich Material oder Konstruktion kann es sein, dass andere Ersatzformen geeigneter als Ellipsen sind.

Die Ellipse liefert für die vorliegenden Seile den ersten der zwei Deformationszustände. Dies ist die irreversible Deformation, die nach der Einwirkung einer Querkraft erhalten bleibt. Der zweite Zustand ist die reversible Deformation. Dieser Zustand liegt während der Einwirkung der Querkraft vor. Diese Deformation wird ausgehend vom Zustand der irreversiblen Deformation berechnet.

Die Gleichungen zur Ellipse 3.4 bis 3.9 sind in Kapitel 3.2.3 gegeben. Diese wird mit den in den Experimenten ermittelten maximalen und minimalen Durchmessern bestimmt.

Die Ermittlung des irreversibel deformierten Seilquerschnitts erfolgt nach der vorliegenden Belastung und der sich daraus ergebenden Parameterkombination aus Seilkraft und Querkraft. Diese lassen sich in den Querdruckversuchen wiederfinden (Kapitel 3.3). Es gibt zwei mögliche Wege, die extremen Durchmesser zu ermitteln. Der erste Weg ist die direkte Auswertung des Modells nach Gleichung (3.39) mit dem Ergebnis der beiden Durchmesser (vgl. Abb. 3.50). Alternativ kann der zweite Weg über die Auswertung des Modells der relativen Rundheit nach Gleichung (3.39) (vgl. Abb. 3.51) und den Zusammenhang von Durchmessern und relative Rundheit (Gleichungen 3.31 und 3.32 und Abb. 3.54) genutzt werden. Die Wahl des Weges kann jeweils nach den zum Seil vorliegenden Daten gewählt werden.

Um für ein Seil den Füllfaktor

$$f_{\text{real}} = \frac{A_{\text{real}}}{A_{\text{Ell}}} = \frac{A_{\text{real}}}{d_{\text{max}} \cdot d_{\text{min}} \cdot \frac{\pi}{4}} \quad (4.1)$$

zu berechnen, sollte ein möglichst nahe liegender Vergleichsquerschnitt im zutreffenden Fall die Ellipse gewählt werden. Gegenüber der Nutzung eines umschreibenden Kreises (vgl. Kapitel 2.2.3) variiert der Füllfaktor dadurch nicht mit dem Deformationszustand des Seilquerschnitts.

Wird der maximale Durchmesser zur Berechnung der Vergleichsfläche verwendet, wird diese Fläche im Vergleich zu einer Ellipse um den Kehrwert der relativen Rundheit des vorliegenden Querschnitts überschätzt. In der Folge wird der berechnete Füllfaktor des Seilquerschnitts damit um den Faktor der relativen Rundheit unterschätzt. Der Vergleich von Seilen mit gleichem realen Querschnitt aber unterschiedlichem Deformationszustand würde in der Berechnung fälschlicherweise einen kleineren Füllfaktor für das stärker deformierte Seil ergeben.

Die reine reversible Deformation des Querschnitts ist in Abb. 4.1 für verschiedene Positionen in den Bereichen in der ersten Zeile zu sehen. Eine teilweise und die vollständige reversible Deformation folgen in Zeile zwei und drei. Die Abbildungen geben jeweils einen Ausschnitt aus dem Wickelpaket wieder. Dieser Ausschnitt ist aus dem mittleren Bereich gewählt und stellt weder die erste oder letzte Lage noch Umwicklungen an den Bordscheiben dar (beispielsweise

die Lagen zwei und drei aus Abb. 3.30).

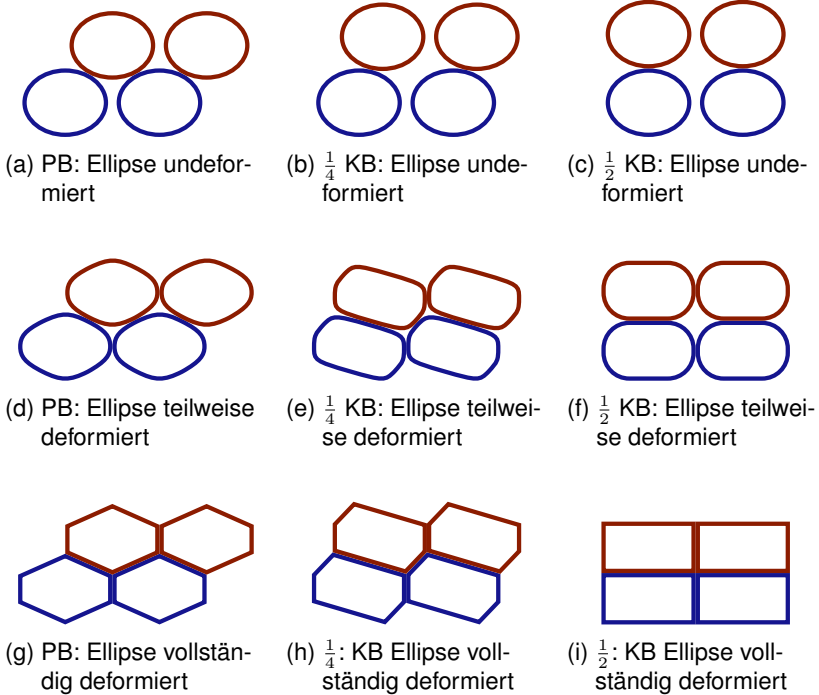


Abb. 4.1: Ellipse in unterschiedlichen Deformationszuständen in den verschiedenen Bereichen aus der Mitte des Wickelpaketes

Die reversibel elastische Deformation wird wie auch die irreversible Deformation nach der jeweiligen Belastungssituation gewählt und berechnet sich nach dem Modell nach Gleichung (3.42) (Abb. 3.60 bis 3.63). Daraus ergibt sich die in Abb. 4.1 schematisch dargestellte Abplattung in den Kontaktbereichen zwischen den Seilquerschnitten.

4.2 Modellberechnungen zum Wickelpaket

Ziel des Modells ist die Beschreibung des Wickelpaktes anhand des Verlaufs des Seils. Im ersten Schritt wird die irreversible Deformation für die Beschreibung der Seilquerschnitte verwendet. Im zweiten wird zusätzlich noch mit dem Querelastizitätsmodul die elastische Deformation des Seilquerschnitts zugrunde gelegt.

4.2.1 Wickelpaket mit reiner irreversibler Seildeformation

Der Aufbau des Wickelpaketes für sich nicht deformierende ideale Ellipsen beruht auf dem tangentialen Kontakt der einzelnen Umwicklungen. Im PB ruht eine Umwicklung auf zwei darunterliegenden (Abb. 4.2).

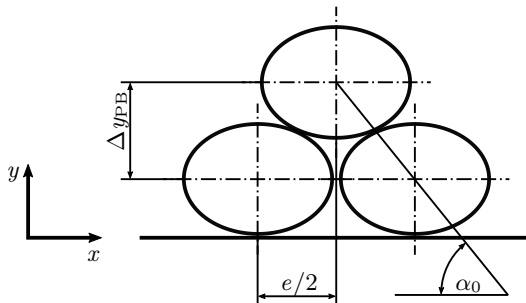


Abb. 4.2: Höhenunterschied Δy_{PB} benachbarter Lagen im Parallelbereich der Trommel

Alle Umwicklungen einer Lage nebeneinander haben den identischen relativen Verlauf bezüglich ihres Startpunktes in axialer und radialer Richtung. Eine Abweichung davon stellen lediglich die Übergänge der Umwicklungen zwischen den Lagen im Aufstiegsbereich dar.

Durch die Vorgabe der Rillung wird das Seil in axialer Trommelrichtung geführt (vgl. Abb. 2.20 und Abb. 3.16). Dabei gibt $\Delta x(\varphi)$ die relative Verschiebung der Umwicklung in axialer Richtung in Bezug auf die Startposition zu Beginn des ersten PB auf der Trommel an. Es wird von der gängigen Aufteilung ausgegangen, dass beide Parallel- und Kreuzungsbereiche jeweils gleich groß sind

und die Summe von jeweils einem PB und KB eine halbe Trommelumdrehung ausmachen.

Da sich das Seil in den PB in axialer Richtung nicht bewegt, ergibt sich dort der konstante Verlauf

$$\Delta x(\varphi) = 0 \quad \text{für} \quad 0 \leq \varphi \leq \varphi_{\text{PB}}. \quad (4.2)$$

Im KB bewegt sich das Seil mit einer konstanten Steigung

$$\Delta x(\varphi) = \frac{\varphi - \varphi_{\text{PB}}}{\varphi_{\text{KB}}} \cdot \frac{e}{2} \quad \text{für} \quad \varphi_{\text{PB}} \leq \varphi \leq \pi \quad (4.3)$$

in axialer Richtung. Dieser Verlauf gilt näherungsweise für alle Lagen. Abweichungen im realen Verlauf sind darauf zurückzuführen, dass das Seil im KB durch den Schrägzug resultierend aus dem Ablenkwinkel und der benachbarten Wicklung in den Verlauf des Kreuzens gebracht wird. Diese Effekte werden hier nicht berücksichtigt.

Zur vollständigen Beschreibung des Seilverlaufs in Abhängigkeit der Trommelumdrehung wird der radiale Verlauf angegeben. In der ersten Lage bleibt das Seil immer in Kontakt mit der Trommel. Der radiale Verlauf kann mit

$$r_1 = \frac{D + d_{\min}}{2} \quad (4.4)$$

beschrieben werden.

Für die folgenden Lagen gilt die Bedingung, dass es immer einen Kontakt zwischen den Umwicklungen der verschiedenen Lagen gibt.

Im PB bedeutet dies, dass die Umwicklung in Lage $i + 1$ immer genau im Tal zweier Umwicklungen der Lage i liegt (Abb. 4.2). Um den Abstand dieser beiden Lagen im PB zu berechnen, kann nach Gleichung (3.4) die Höhe der Ellipse

$$y_{Ell} = \sqrt{b^2 - \frac{b^2}{a^2} \cdot x_{Ell}^2}. \quad (4.5)$$

an jeder beliebigen Stelle bestimmt werden.

Da die Umwicklungen im PB im Tal der Umwicklungen eine Lage tiefer liegen, ist der axiale Abstand zwischen sich berührenden Umwicklungen benachbarter Lagen $\frac{e}{2}$. Weiterhin handelt es sich um Ellipsen gleicher Größe, wodurch der Berührungspunkt eindeutig definiert ist. Die Umwicklungen bewegen sich im PB nicht in axialer Richtung (Gleichung (4.2)). Daher gibt es auch keine Veränderung der Höhendifferenz

$$\Delta y_{PB} = 2 \cdot \sqrt{b^2 - \frac{b^2}{a^2} \cdot \left(\frac{e}{4}\right)^2} \quad (4.6)$$

zwischen zwei Lagen.

Allgemein ergibt sich der Winkel

$$\cot(\alpha) = \frac{y_{Ell}}{x_{Ell}} \quad (4.7)$$

zwischen den Umwicklungen unterschiedlicher Lagen aus der Kontaktstelle zwischen den sich berührenden Ellipsen (vgl. Gleichung (2.13)). Im PB kann damit der Keilwinkel

$$\tan(\alpha_0) = \frac{\Delta y_{PB}}{e/2}. \quad (4.8)$$

im Wickelpaket berechnet werden (Abb. 4.2, vgl. Gleichung (2.14)).

Im Kreuzungsbereich führen die Umwicklungen benachbarter Lagen gegenläufige axiale Bewegungen aus, um in das nächste Tal zu gelangen (Gleichung (4.3) und Abb. 4.3).

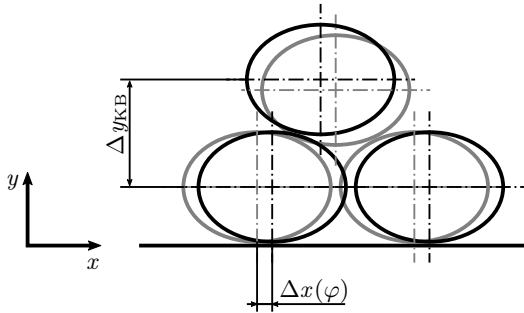


Abb. 4.3: Höhenunterschied Δy_{KB} benachbarter Lagen im Kreuzungsbereich der Trommel

Da sie dazu übereinander überlaufen müssen, gibt es eine Veränderung des Wickelradius

$$\Delta y_{KB} = 2 \cdot \sqrt{b^2 - \frac{b^2}{a^2} \cdot \left(\frac{e}{4} - \Delta x(\varphi)\right)^2} \quad \text{für} \quad 0 \leq x(\varphi) \leq \frac{e}{2} \quad (4.9)$$

in Abhängigkeit der Trommeldrehung (Abb. 4.3).

Die Anwendung der Gleichungen 4.2 bis 4.9 ergibt die Darstellung des Wickelpaketes wie in Abb. 4.4 gezeigt.

Der Verlauf der Umwicklungen ist analog zu den in Kapitel 3.2.2 gezeigten Ergebnissen dargestellt. Das Wickelpaket ist für ein ideal rundes Seil mit 23 mm auf Trommel 1 gerechnet. Zum besseren Überblick ist die Trommellänge auf fünf Umwicklungen reduziert.

4.2.2 Wickelpaket mit irreversibler und reversibler Seildeformation

Um im Modell des Wickelpaketes auch die elastische Deformation der Seilquerschnitte zu berücksichtigen, werden die in Kapitel 2.3.2 vorgestellten Gleichungen verwendet. Mit Gleichung (2.5) werden die Einzeldruckanteile jeder Lage berechnet. Da dieser Druck für die Deformation der Querschnitte verantwort-

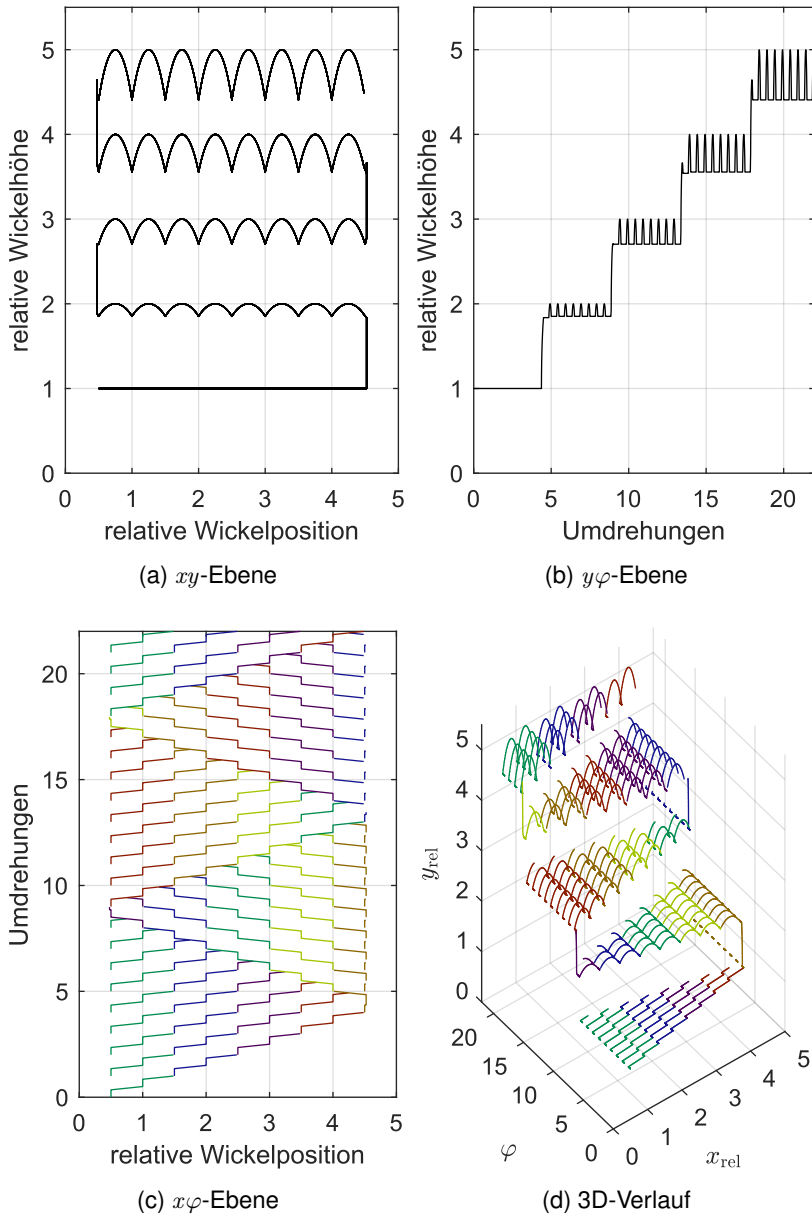


Abb. 4.4: Seilverlauf bei reiner Berücksichtigung der irreversiblen Deformation eines runden Seils mit $d = 23 \text{ mm}$ auf Trommel 1

lich ist, wird auf dieser Grundlage die individuelle Absenkung jeder Lage berechenbar. Insgesamt wird damit das elastische Zusammenspiel von Seil und Trommel berücksichtigt.

Für die Berechnung wird zwischen dem PB und dem KB unterschieden (Abb. 4.5). Dies gilt für die Kraftleitung innerhalb des Wickelpaketes und für die sich ergebenden Wickelradien, welche die Höhe des Wickeldrucks bestimmen.

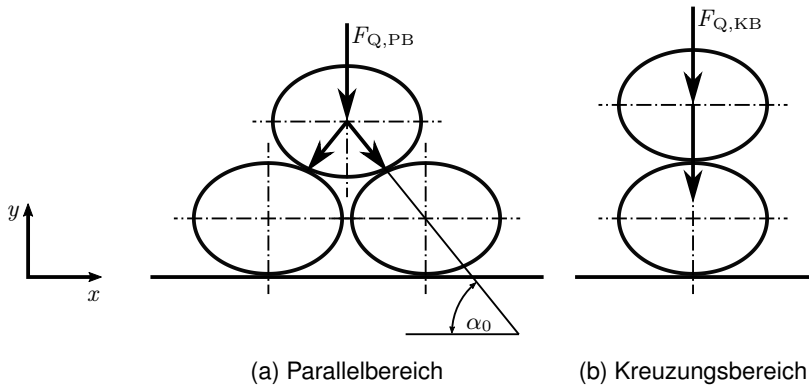


Abb. 4.5: Weiterleitung der Querkraft im Wickelpaket

Um die Ergebnisse mit dem Experiment vergleichen zu können, werden die Berechnungen nacheinander von einer bis zur obersten Lage durchgeführt. Damit können jeweils die Wickelhöhen für gleiche Lagenzahlen aus der Berechnung mit den Werten des Wickelversuchs verglichen werden.

Die Auswahl der Seilquerschnitte nach der irreversiblen Deformation und das elastische Verhalten nach der reversiblen Deformation werden nach den im Querdruckversuch (Kapitel 3.3) ermittelten Werten vorgenommen (Kapitel 4.1).

Der maximale Durchmesser wird nach der Auswahl auf das Passen zur Rillenbreite hin überprüft. Ein maximaler Durchmesser kleiner als die Rillenbreite passt problemlos in das Wickelpaket. Wenn er jedoch größer ist, wird seine Ausdehnung auf die Rillensteigung festgesetzt. Der radiale Durchmesser des Seils wird unter der Bedingung einer konstanten Fläche angepasst. In der ersten Lage wird dabei der Rillenquerschnitt berücksichtigt. In den folgenden Lagen wird die Deformation entsprechend Abb. 4.1 angenommen.

Die elastische Absenkung jeder Umwicklung wird entsprechend des Querdrukversuchs berechnet. Dafür wird die Vereinfachung getroffen, dass sich als Näherung der Seilquerschnitt in beiden Bereichen wie im Querdrukversuch verhält. Durch Berücksichtigung aller jeweils vorherigen Lagen wird die Absenkung aller Lagen berechnet.

Die Wickelhöhe wird iterativ bestimmt, da zu Beginn der Berechnung keine Ergebnisse für den Druck der einzelnen Lagen und die sich einstellenden entlasteten Seilkräfte vorliegen. Liegen dann Werte für den Druck vor, kann das Querspannungsverhältnis berechnet werden. Mit den nun vorliegenden Werten der entlasteten Seilkräfte und der Querspannungsverhältnisse werden die Werte zur irreversiblen und reversiblen Deformation aktualisiert. Als Konvergenzkriterium dient die Veränderung des Wickelradius in der jeweils obersten Lage.

Das Ergebnis des Modells ist die Wickelhöhe in PB und KB jeder Lage. Mit diesen Werten werden die kontinuierlichen Werte des Modells mit ausschließlich irreversibler Deformation korrigiert. Insgesamt liegt dann ein kontinuierlicher Wickelverlauf mit Berücksichtigung der elastischen reversiblen Deformation vor.

4.3 Vergleich experimenteller und analytischer Ergebnisse

Die Berechnung nimmt den Verlauf des Seils in der Rille, im PB und im KB ideal an. Davon abweichend kommt es im Experiment zu einem Aufstauchen des Querschnitts durch die Seilbewegung in axialer Richtung im KB. Dies bewirkt in diesem Bereich eine Vergrößerung der Wickelhöhe. In der Berechnung wird dieser Effekt durch einen Faktor ausgeglichen.

Eine weitere Anpassung betrifft die Bewertung der relativen Rundheit von prinzipiell runden Seilen. Wenn der minimale Durchmesser um das Seil umläuft und nicht durch eine Deformation bedingt ist, kann dieser Zustand in der Berechnung Berücksichtigung finden. Dies kann beispielsweise bei Drahtseilen erforderlich sein.

In Abb. 4.6a ist der Verlauf der relativen Wickelhöhen in Abhängigkeit der jeweils gewickelten Lagen zu sehen. Es ist erkennbar, dass eine neu gewickelte

Lage zunächst eine höhere relative Wickelhöhe in PB und KB hat. Wird sie anschließend von der folgenden Lage überdeckt, wird sie durch deren Wickeldruck zusammengedrückt. Auch der Höhenunterschied zwischen den Bereichen wird durch die folgende Bewicklung reduziert.

Für Seil 1.3 ist der Boxplot der Wickelhöhe aus Abb. 3.18a um das Ergebnis der Modellrechnung erweitert. Es ist eine gute Übereinstimmung zu sehen.

In den folgenden Abb. 4.7 bis 4.12 ist der Vergleich der experimentell ermittelten relativen Wickelhöhen zu den verschiedenen Berechnungsmodellen dargestellt. Als erstes ist das in Kapitel 4.2.2 vorgestellte Modell mit irreversibler und reversibler Deformation basierend auf elliptischen Seilquerschnitten zu sehen. Außerdem das Modell aus Kapitel 4.2.1 mit Berücksichtigung von reiner irreversibler Deformation und damit idealen Ellipsen. Abschließend ist zum Vergleich die relative Wickelhöhe für den Nenndurchmesser der Seile im PB und KB berechnet.

Die gute Übereinstimmung zwischen Experiment und Berechnung für Seil 1.3 für das zweite Modell ist auch in Abb. 4.7 zu erkennen. Zudem wird die bessere Vorhersagegenauigkeit gegenüber den anderen Modellen deutlich.

Der Unterschied in der Vorhersagegenauigkeit im PB ist für das Drahtseil 2.1 bei den unterschiedlichen Modellen kaum erkennbar. Für den KB liefert jedoch das zweite Modell eine etwas bessere Voraussage für die Wickelhöhe.

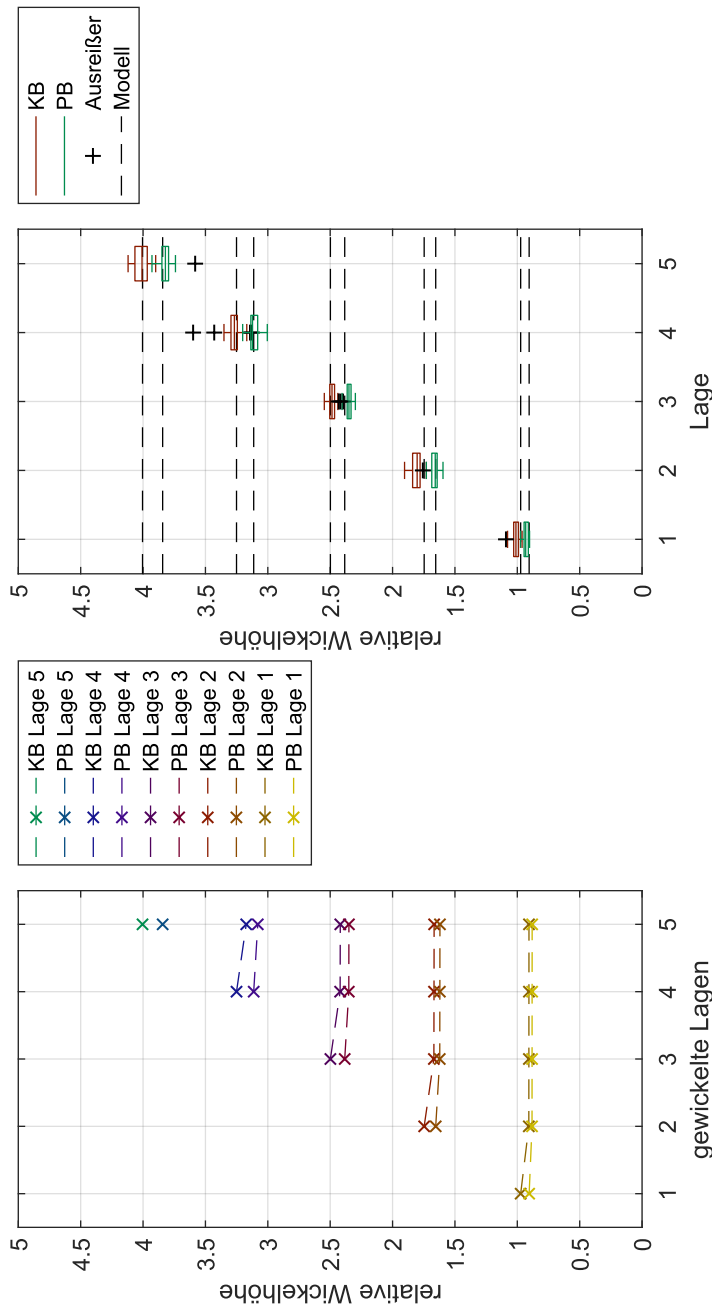
Für das Seil 1.1 ergibt das zweite Modell ebenfalls eine gute Übereinstimmung für beide Bereiche.

Die Berechnung der relativen Wickelhöhe für Seil 1.2 hat weitgehend eine gute Übereinstimmung mit dem Experiment.

Für Seil 1.4 ergeben sich die größten Abweichungen zwischen Modell zwei und dem Experiment. Doch selbst in diesem Fall liegt noch eine befriedigende Übereinstimmung vor.

Auch im Fall von Seil 1.5 gibt es eine befriedigende Übereinstimmung zwischen der Berechnung nach Modell zwei und den Experimenten.

Eine mögliche Ursache für die schlechtere Vorhersage im Fall von Seil 1.4 und Seil 1.5 könnte an den relativ großen maximalen Durchmessern liegen (vgl.



(a) Veränderung relative Wickelhöhe nach gewickelten Lagen (b) Vergleich relative Wickelhöhe aus Experiment und Modell

Abb. 4.6: Wickelhöhe je Lage im Parallelbereich und im Kreuzungsbereich von Seil 1.3

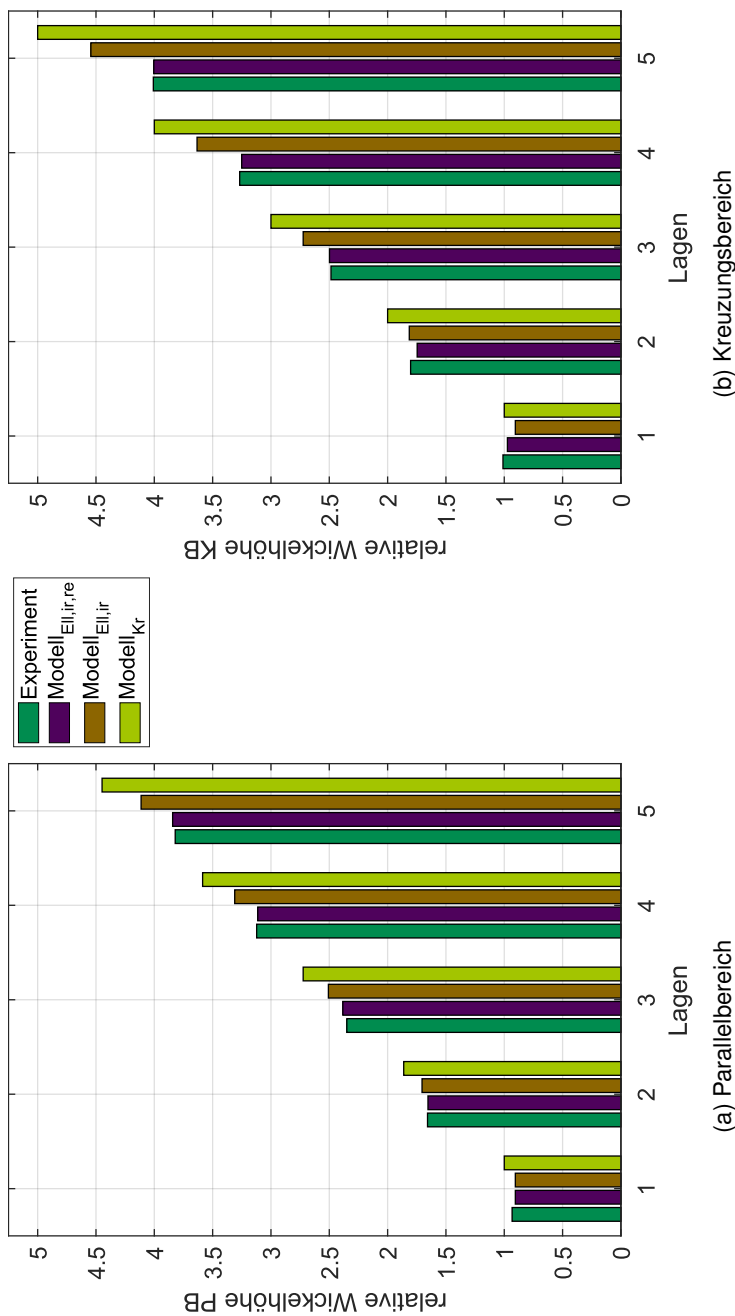


Abb. 4.7: Vergleich der relativen Wickelhöhe aus Experiment und verschiedenen Modellen Seil 1.3: Ellipsen mit irreversibler und reversibler ($_{Ell,ir,rev}$), Ellipsen mit irreversibler ($_{Ell,ir}$) und Kreise ($_{Ell,Kr}$) (d_n) ohne Deformation

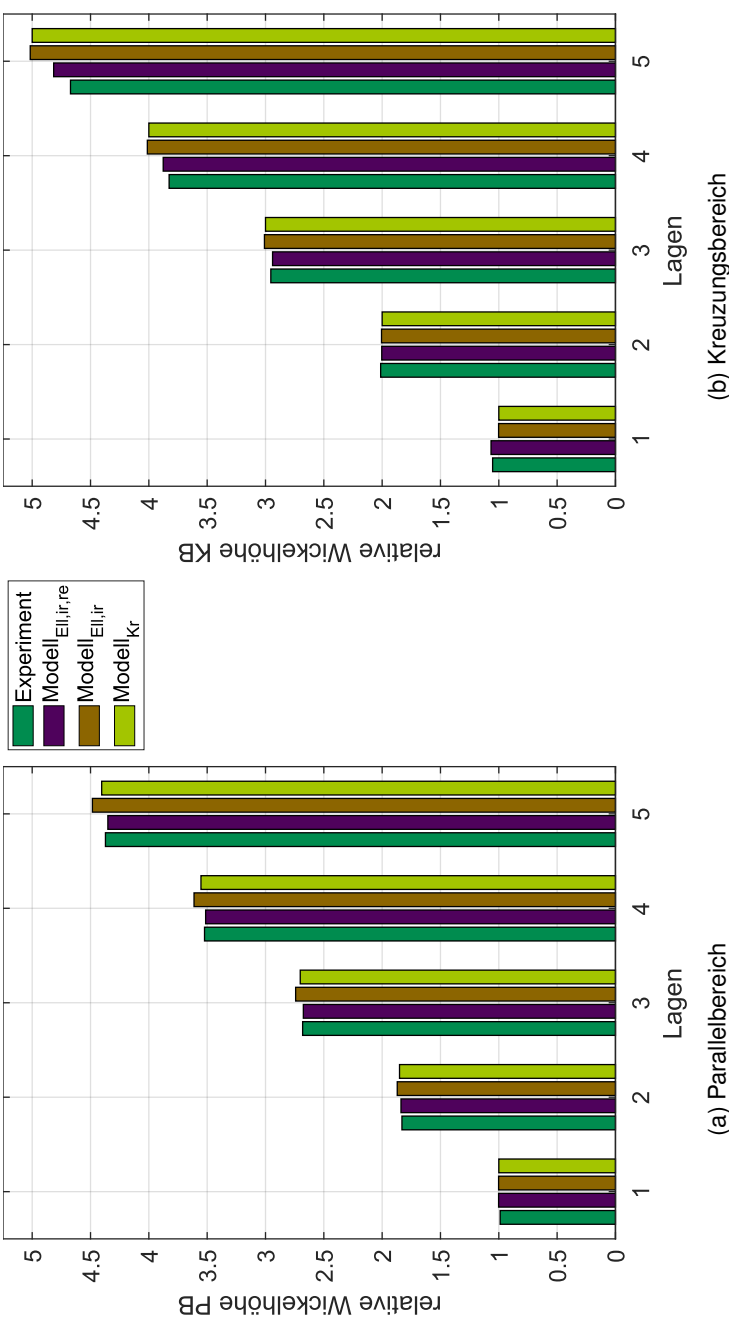


Abb. 4.8: Vergleich der relativen Wickelhöhe aus Experiment und verschiedenen Modellen Seil 2.1: Ellipsen mit irreversibler und reversibler ($_{Ell,ir,rev}$), Ellipsen mit irreversibler ($_{Ell,ir}$) und Kreise ($_{Kr}$) (d_n) ohne Deformation

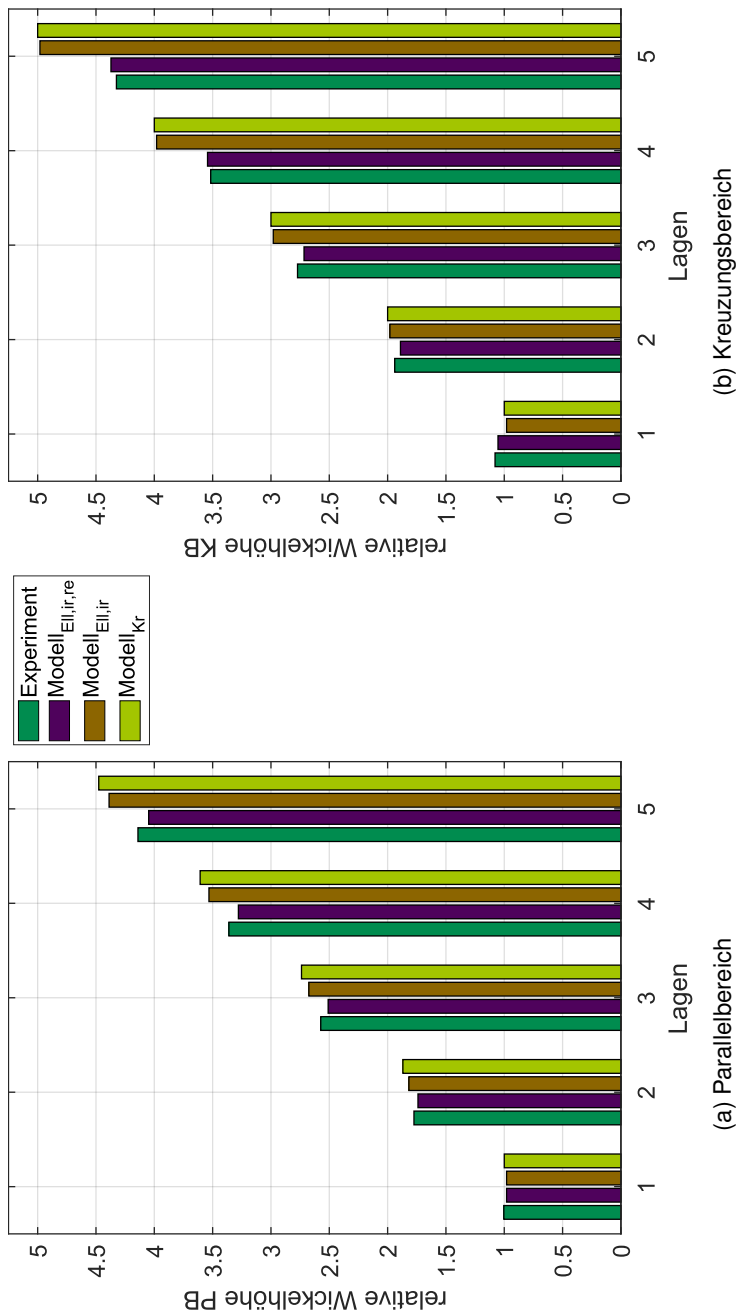


Abb. 4.9: Vergleich der relativen Wickelhöhe aus Experiment und verschiedenen Modellen Seil 1.1: Ellipsen mit irreversibler und reversibler ($_{Ell,ir,rev}$), Ellipsen mit irreversibler ($_{Ell,ir}$) und Kreise ($_{Kr}$) (d_n) ohne Deformation

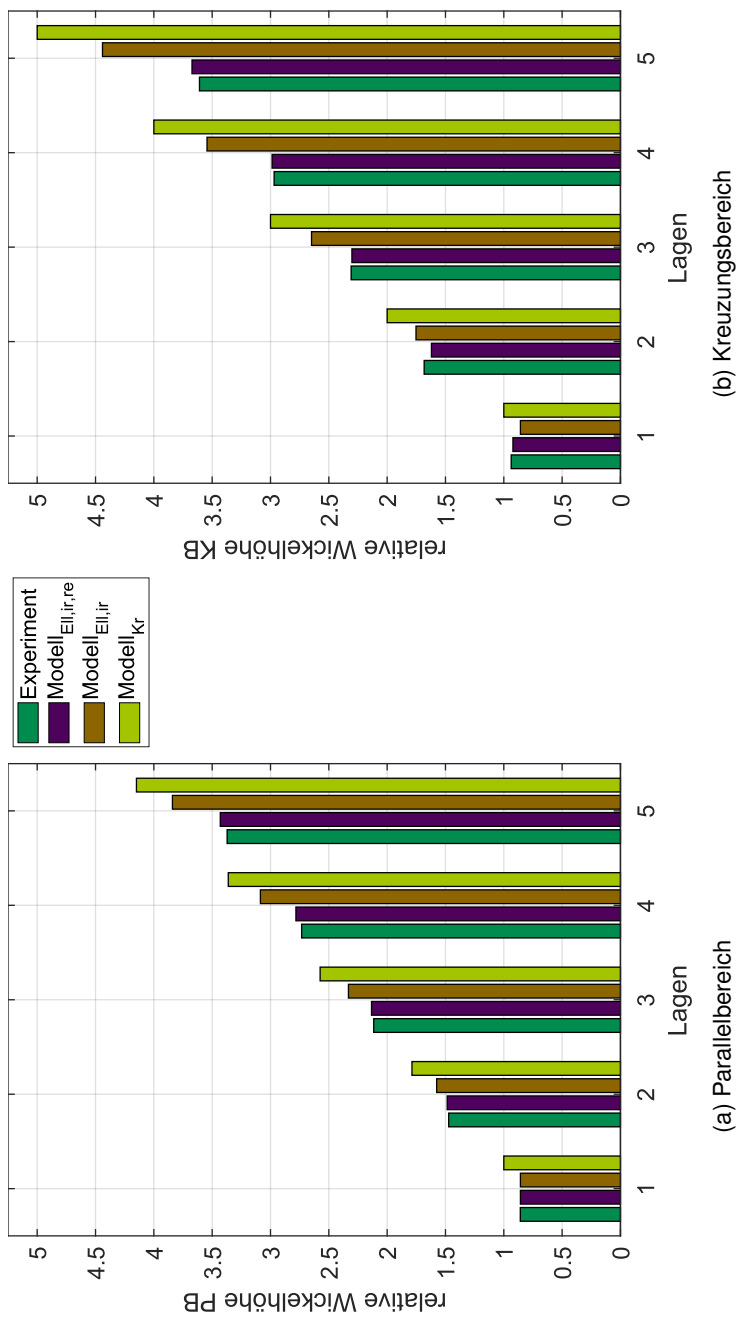


Abb. 4.10: Vergleich der relativen Wickelhöhe aus Experiment und verschiedenen Modellen Seil 1.2: Ellipsen mit irreversibler und reversibler ($_{Ell,ir,re}$), Ellipsen mit irreversibler ($_{Ell,ir}$) und Kreise ($_{Kr}$) (d_n) ohne Deformation

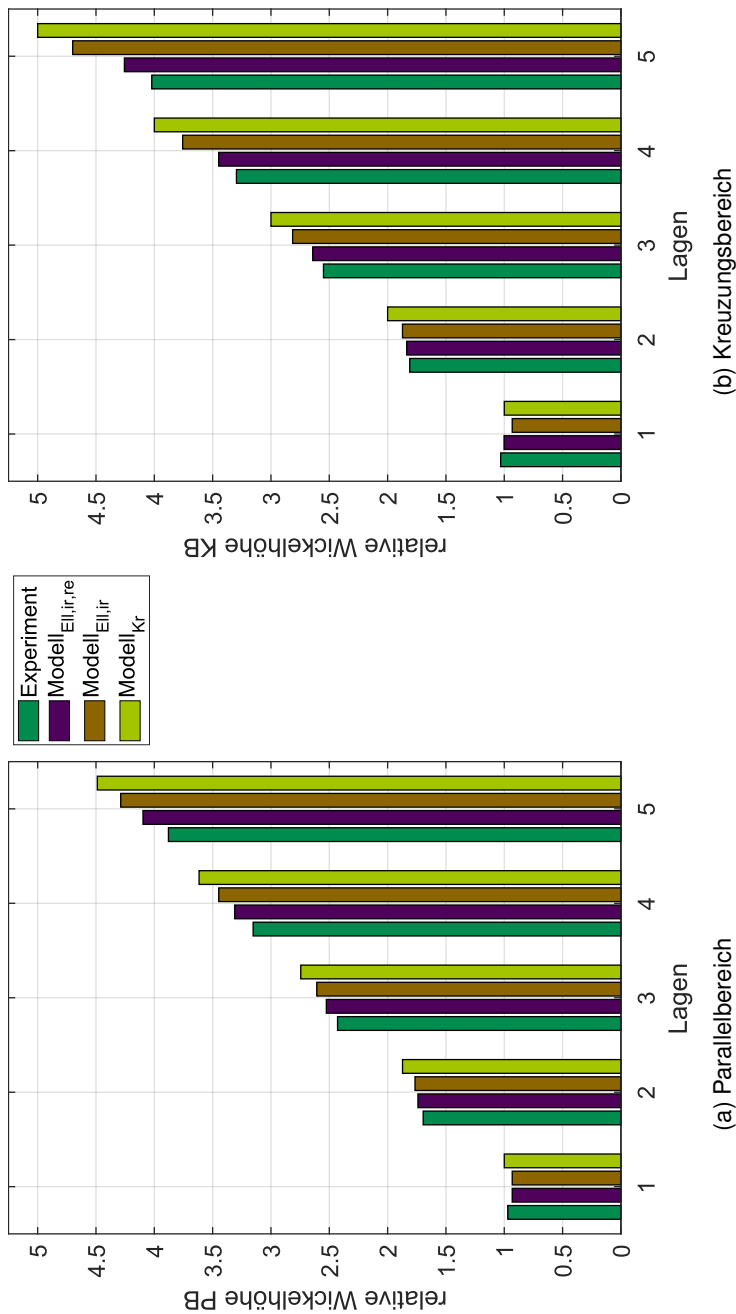


Abb. 4.11: Vergleich der relativen Wickelhöhe aus Experiment und verschiedenen Modellen Seil 1.4: Ellipsen mit irreversibler und reversibler (_{Ell,ir,rev}), Ellipsen mit irreversibler (_{Ell,ir}) und Kreise (_{Kr}) (d_n) ohne Deformation

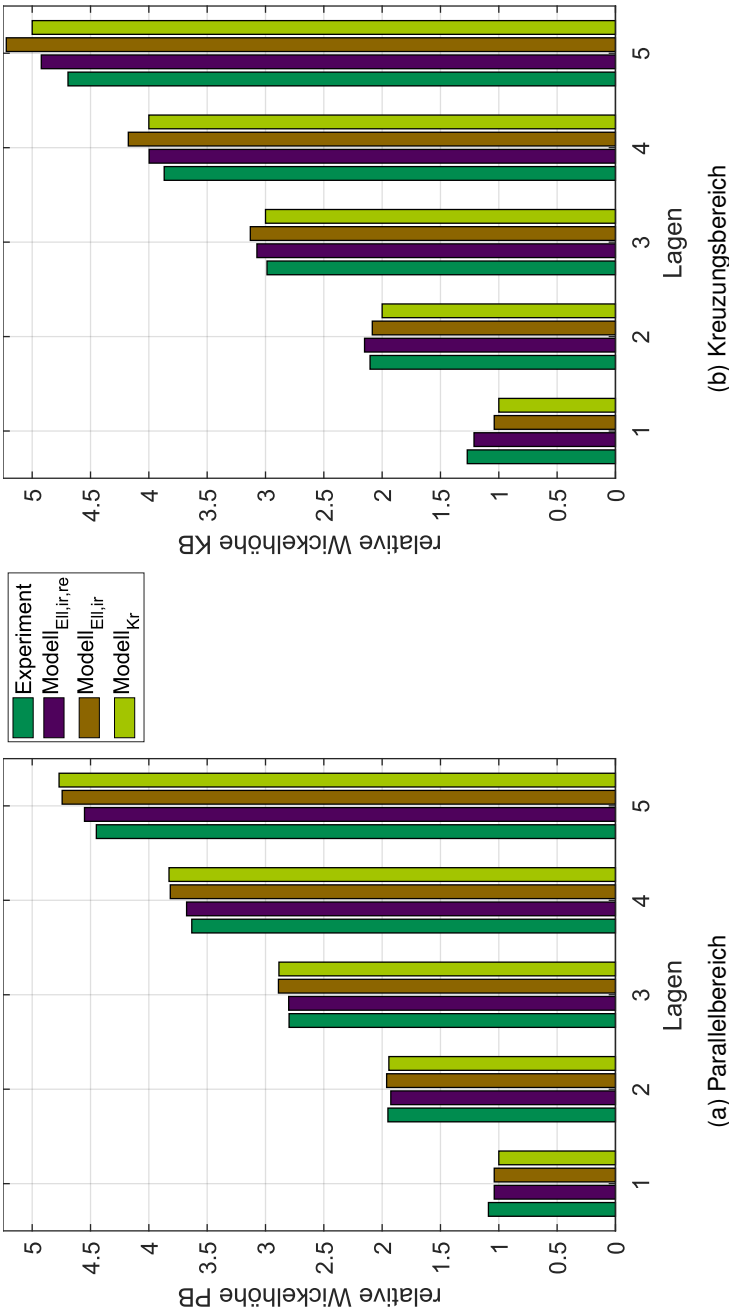


Abb. 4.12: Vergleich der relativen Wickelhöhe aus Experiment und verschiedenen Modellen Seil 1.5: Ellipsen mit irreversibler und reversibler (_{Ell,ir,re}), Ellipsen mit irreversibler (_{Ell,ir}) und Kreise (_{Kr}) (d_n) ohne Deformation

Abb. 3.48). Durch die Kompensation des maximalen Durchmessers gegenüber der Rillenbreite wird der minimale Durchmesser demnach zu stark erhöht.

Insgesamt liefert das zweite Berechnungsmodell mit Berücksichtigung von irreversibler und reversibler Deformation eine gute und zum Teil zufriedenstellende Übereinstimmung mit dem Experiment. Die Abweichung zwischen Experiment und Berechnung liegt nicht über 6 %.

Mithilfe der in der Berechnung ausgewerteten Seilquerschnitte kann der Füllfaktor des Wickelpaketes

$$f_W = \frac{\sum_{i=1}^l A_{\text{Ell},i} \cdot u}{L \cdot H_{o,l}} \quad (4.10)$$

ausgewiesen werden. Dieser gibt an, wie viel Platz des Wickelpaketes auf der Trommel auch von Seilquerschnitten eingenommen wird [HSF16]. In dieser Betrachtung werden für die Seilquerschnitte die Fläche der Ersatzellipsen verwendet.

Aufgrund der Abweichungen aus Experiment und Berechnung ergeben sich Unterschiede für den Füllfaktor des Wickelpaketes. Insgesamt zeigt sich qualitativ der gleiche Verlauf aus beiden Werten (Abb. 4.13).

Wie aufgrund des stabilen Querschnitts zu erwarten war, hat das Drahtseil 2.1 den geringsten Füllfaktor für das Wickelpaket. Die Werte für das Seil 1.1 mit zusätzlichem Kern und Mantel und für das Seil 1.5 mit dem zusätzlichen Kern können so ebenfalls erwartet werden. Überraschend ist der geringe Füllfaktor des Wickelpaketes von Seil 1.2. Dieser kann womöglich auf den für die Trommel 1 zu kleinen Seildurchmesser zurückzuführen sein. Ebenso fällt der Füllfaktor größer eins für Seil 1.4 auf. Dies ist durch die Verwendung des elliptischen Querschnitts in Verbindung mit der aus dem Experiment stammenden Wickelhöhe zu erklären.

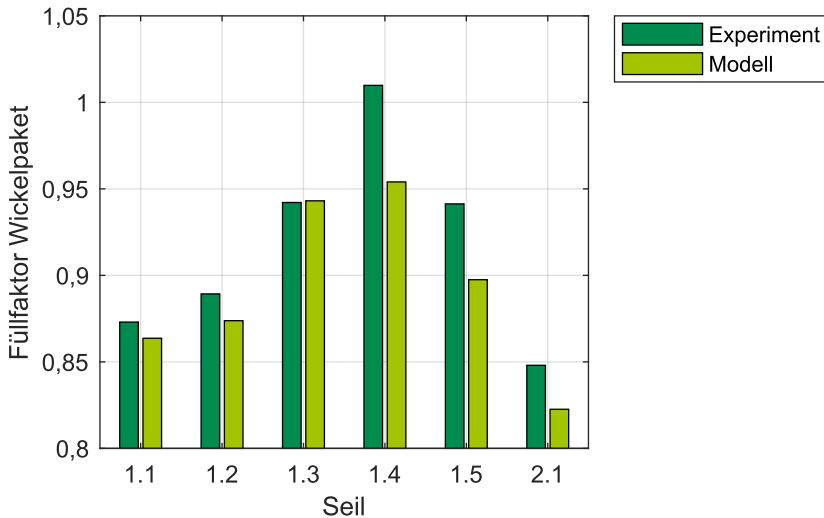


Abb. 4.13: Füllfaktor des Wickelpaketes nach Wickelhöhe aus Experiment und nach Berechnung

4.4 Wickelpaket Berechnung – Zusammenfassung und Bewertung

Durch die Erweiterung der Berechnungsmethode der Trommelbelastung (vgl. Kapitel 2.3.2) kann der Soll-Verlauf des Seils auf der mehrlagig bewickelten Trommel beschrieben werden. Das Modell zur Berechnung des Wickelpaketes mit irreversibler und reversibler Seildeformation (vgl. Kapitel 4.2.2) liefert eine gute Übereinstimmung zum Experiment. Somit liegt die zweite Voraussetzung zur Berechnung eines Soll-Ist-Vergleichs vor.

5 Wickelqualität

Dieses Kapitel beschreibt Möglichkeiten zur Bewertung der Wickelqualität. Das bedeutet, dass eine Beurteilung vorgenommen werden soll, ob die einzelnen Umwicklungen fehlerfrei sind und das sich aufwickelnde und abschließend zustande gekommene Wickelpaket gut aufgebaut ist und keine Wickelfehler vorliegen (vgl. Kapitel 2.4.3).

Bei groben Wickelfehlern ist die Beurteilung einfach visuell möglich. Schwieriger ist die Beurteilung bei leichten Ungleichmäßigkeiten. In diesem Fall bietet die Zusammenführung des vorgestellten Untersuchungsverfahrens für das Wickelpaket (Kapitel 3.2.1) und die Berechnung desselben (Kapitel 4.2.2) die Möglichkeit, eine quantitative Aussage über die sich einstellende Wickelqualität zu treffen.

5.1 Visuelle Beurteilung der Wickelqualität

Zur visuellen Beurteilung der Wickelqualität werden Fotos der mit fünf Lagen bewickelten Trommel verglichen (Abb. 5.1). Die Bewicklung der Trommel beginnt in der ersten Lage an der linken Bordscheibe.

Seil 1.1 zeigt über einen relativ großen Anteil der Trommellänge ein gutes Wickelpaket. Die Umwicklungen liegen geordnet nebeneinander und weisen augenscheinlich die gleiche Wickelhöhe auf. Dies kann auf den stabilen Querschnitt des Seils zurückgeführt werden. Dieser ist ein Ergebnis des zusätzlichen Kerns und des Mantels. Der stabile Querschnitt ermöglicht dabei einen geordneten Aufbau der Pyramide des PB. Insgesamt sind 36 geordnete Umwicklungen erkennbar. Damit fehlen an der rechten Bordscheibe ungefähr ein bis zwei und an der linken ungefähr zwei bis drei Umwicklungen, die nicht geordnet im Wickelpaket liegen. Der Grund für die schlechtere Bewicklung ist der relativ hohe Ablenkwinkel und der daraus resultierende Schrägzug (vgl. Kapi-

Seil 1.1



Seil 1.2



Seil 1.3



Seil 1.4



Seil 1.5



Abb. 5.1: Wickelpaket fünfte Lage zur visuellen Beurteilung der Wickelqualität

tel 2.3.1).

Die schlechtere Wicklung neben den Bordscheiben durch den Schrägzug liegt auch bei den anderen Seilen vor. Hier wirkt sich dieser Effekt aufgrund der geringeren Querschnittsstabilität noch stärker aus. Seil 1.5 mit seinem zusätzlichem Kern im Aufbau weist im Bereich der linken Trommelhälfte bis auf direkt neben der Bordscheibe ein im Aufbau geordnetes Wickelpaket auf. Dies ist auf den stabilen Querschnitt des Seils zurückzuführen. Der sehr ungeordnete Bereich in der rechten Trommelhälfte ist auf ein Einschneiden zurückzuführen (vgl. Abb. 3.21b). Dieses Einschneiden hat bei diesem Seil stattgefunden, da vor allem der maximale Seildurchmesser nicht zur Rillung passt (vgl. Abb. 3.48b).

Die Seile 1.3 und 1.4 zeigen in der fünften Lage ein relativ ähnliches Wickelpaket. Es sind leichte Unregelmäßigkeiten in Form von zu großen Abständen zwischen den einzelnen Umwicklungen zu erkennen. Zudem weist Seil 1.3 etwas mehr als Seil 1.4 unvollständige Lagen in der Nähe der Bordscheiben auf.

Auch das Wickelpaket von Seil 1.2 ist in den Bereichen der Bordscheiben unregelmäßig gewickelt. Neben den fehlenden Umwicklungen in diesem Bereich sind jedoch auch über die gesamte Länge der Trommel Lücken zwischen den Umwicklungen zu erkennen. Dies ist auf den zu kleinen maximalen Durchmesser des Seils zurückzuführen (vgl. Abb. 3.47b).

5.2 Quantitative Beurteilung der Wickelqualität

Dieses Kapitel ist in zwei Abschnitte unterteilt. Zuerst wird das Vorgehen zur Ermittlung der quantitativen Beurteilung der Wickelqualität und anschließend werden exemplarisch zu den Seilen 1.1 bis 1.5 und Seil 2.1 Ergebnisse vorgestellt.

5.2.1 Quantitative Wickelqualität – Messung und Auswertung

In Abb. 5.2 sind für einen exemplarischen Wickelpaketquerschnitt von Seil 1.3 zusätzlich zu den mit dem Laser-Profil-Scanner aufgenommenen Umwicklungen die Soll-Umwicklungen angegeben. Die Dimensionen der Ellipsen sind

entsprechend der Auswertung des Modells nach Kapitel 4.2.2 und damit nach den Experimenten (Kapitel 3.3.1) entsprechend der Belastung je Lage gewählt. Die Überschneidungen der Ellipsen machen den reversiblen (elastischen) Anteil der Deformation der Seilquerschnitte im Wickelpaket sichtbar. Außerdem sind die Soll- und Ist-Positionen der auswertbaren Umwicklungen markiert. Die Soll-Position wird für jede aufgenommene Umwicklung entsprechend seiner Winkelposition auf der Trommel berechnet.

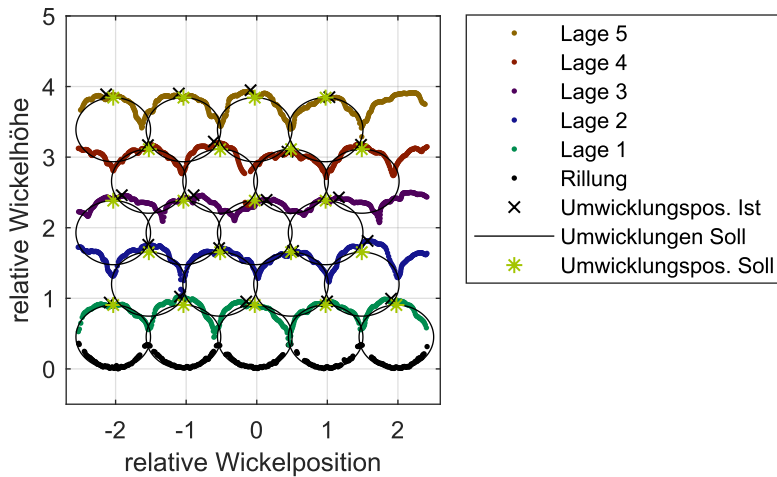


Abb. 5.2: Faserseilwickelpaket 1.3 mit Soll-Ist-Vergleich der Umwicklungen (vgl. Abb. 3.8)

Es ist erkennbar, dass es bei manchen Umwicklungen hauptsächlich eine axiale

$$abst_x = \|P_{Ist,x} - P_{Soll,x}\|, \quad (5.1)$$

bei anderen eine radiale

$$abst_y = \|P_{Ist,y} - P_{Soll,y}\| \quad (5.2)$$

und teilweise auch eine Abweichung in beiden Richtungen

$$abst = \|P_{\text{Ist}} - P_{\text{Soll}}\| \quad (5.3)$$

gibt. Die Abstände sind exemplarisch für eine Umwicklung der fünften Lage in Abb. 5.3 angegeben.

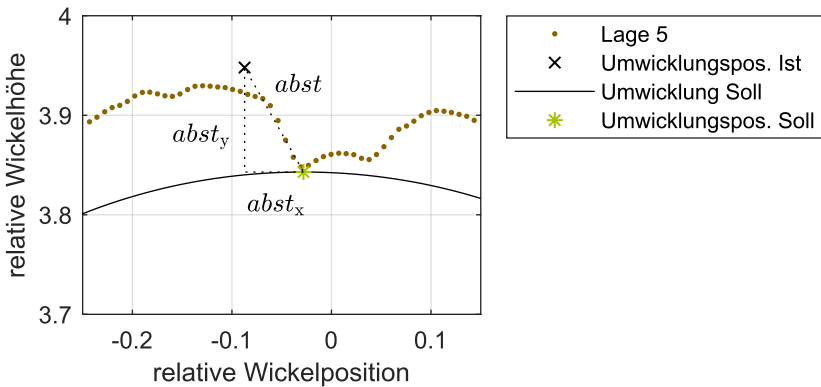


Abb. 5.3: Detail Faserseilwickelpaket 1.3 Soll-Ist-Vergleich mit Angabe der verschiedenen Abstände

Aus diesen Abweichungen wird die quantitative Wickelqualität

$$wq = 1 - \frac{abst \cdot 2}{e} \quad (5.4)$$

$$wq_x = 1 - \frac{abst_x \cdot 2}{e} \quad (5.5)$$

$$wq_y = 1 - \frac{abst_y \cdot 2}{e} \quad (5.6)$$

berechnet. Der Soll-Ist-Abstand wird in axialer und radialer Richtung und für die kürzeste Verbindung ausgewertet.

Die Abweichung in axialer Richtung ist begrenzt, da eine Umwicklung mit einer Abweichung größer als dem halben Rillenabstand einer anderen Rillung zugeordnet würde. Die maximale Abweichung wird damit durch die unbekannte

radiale Abweichung bestimmt.

Die Abstände werden ins Verhältnis zum halben Rillenabstand gesetzt. Dieser Wert kann prinzipiell frei gewählt werden. Mit diesem Referenzwert wird festgelegt, ab welchem Abstand sich theoretisch ein negativer Wert ergeben würde. Dieser wird in der Auswertung auf null gesetzt. Damit wird das Fehlen einer Umwicklung im Ergebnis festgehalten.

Die berechnete Wickelqualität für die einzelnen Umwicklungen wq ist für denselben Wickelpaketquerschnitt aus Abb. 5.2 in Abb. 5.4 dargestellt. Die Wickelqualität liegt allgemein zwischen 0,85 und 0,98. In den Lagen eins, zwei, vier und fünf weichen einzelne deformierte Umwicklungen davon ab. Die dritte Lage ist insgesamt in die positive axiale Richtung gegenüber der Soll-Position verschoben und daher mit niedrigeren Werten von 0,6 und 0,75 bewertet.

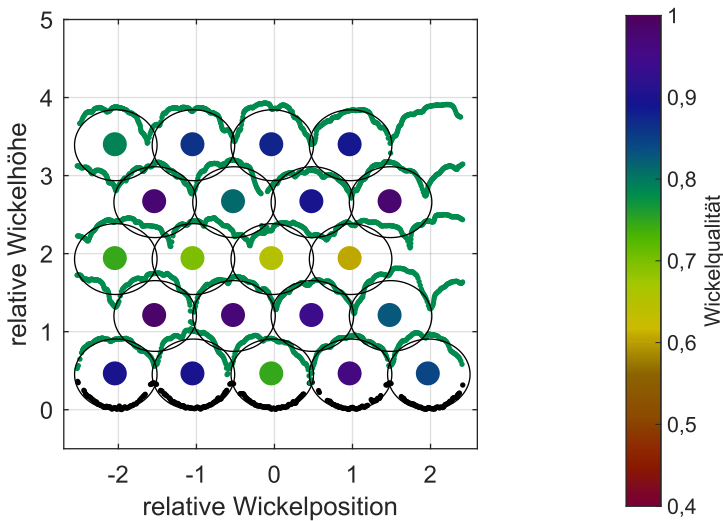


Abb. 5.4: Faserseilwickelpaket mit Soll-Ist-Vergleich der Umwicklungen mit farblich gekennzeichnete Bewertung

Für die Rillung wird analog die Rillungsqualität

$$rq = 1 - \frac{abst \cdot 2}{e} \quad (5.7)$$

$$rq_x = 1 - \frac{abst_x \cdot 2}{e} \quad (5.8)$$

$$rq_y = 1 - \frac{abst_y \cdot 2}{e} \quad (5.9)$$

berechnet. Diese ist wichtig, um die Wickelqualität bewerten zu können, da der Verlauf des Wickelpaktes nicht besser als der Verlauf der Rillung werden kann.

Die Wickelqualität und die Rillungsqualität einzelner Punkte werden anschließend nach verschiedenen Kriterien zusammengefasst. Der Median

$$WQ \quad (5.10)$$

der Wickelqualität aller ausgewerteten Umwicklungen beschreibt die Wickelqualität des gesamten Wickelpakets beziehungsweise des analysierten Bereichs. Die Mediane

$$WQ_i = \begin{bmatrix} wq_1 \\ wq_2 \\ \vdots \\ wq_l \end{bmatrix} \quad (5.11)$$

der Wickelqualität der jeweiligen Lage geben die Wickelqualität aller sichtbaren Umwicklungen einer Lage wieder (Kapitel 5.2.2). Die Mediane

$$WQ_{i,u} = \begin{bmatrix} wq_{1,1} & wq_{1,2} & \cdots & wq_{1,u} \\ wq_{2,1} & wq_{2,2} & \cdots & wq_{2,u} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ wq_{l,1} & wq_{l,2} & \cdots & wq_{l,u} \end{bmatrix} \quad (5.12)$$

der Wickelqualität aller sichtbaren Umwicklungen einer Lage stellen die Kenn-

werte für die Qualität einzelner Umwicklungen dar (Kapitel 6.1). Abschließend kann für jede Umwicklung die Qualität anhand des Medians

$$WQ_{l,u,d} \quad (5.13)$$

angegeben werden. Werden die Lage und die Umwicklung konstant gehalten, kann eine Veränderung der Qualität dieser Umwicklung im Laufe einer Bewicklung über mehrere Umdrehungen verfolgt werden (Kapitel 6.1).

5.2.2 Quantitative Wickelqualität – Ergebnisse

Die exemplarischen Ergebnisse der ausgewerteten Wickelqualität beziehen sich auf die mit den LPS aufgenommenen Bereiche. Die fehlenden Umwicklungen neben den Bordscheiben liegen nicht im betrachteten Bereich (vgl. Abb. 5.1). Die Rillungsqualität wird nicht kompensiert, um das tatsächliche Resultat des gesamten Systems aus Trommel und Seil darzustellen.

Es wird der Verlauf der Rillung und des Wickelpakets jeweils für einen kompletten Versuch ermittelt. Der Verlauf der Rillungs- und Wickelqualität wird zur einfachen optischen Erfassung als Heatmap und zum Ablesen der Werte als Boxplot dargestellt.

Die Rillungsqualität von Trommel 1 ist in Abb. 5.5 als Heatmap zu sehen. In den ersten beiden Bildern ist die Rillungsqualität nach der axialen und der radialen Richtung einzeln ausgewertet. Es ist erkennbar, dass die höchste Abweichung vom Soll-Verlauf in axialer Richtung in den KB vorliegt.

Der Boxplot in Abb. 5.6 zeigt die Werte der Rillungsqualität ebenfalls für Trommel 1. Hier ist erkennbar, dass der Verlauf in axialer Richtung dem theoretischen genauer entspricht als der radiale. Dies liegt an der geringeren Anzahl der Punkte im KB und der daraus resultierenden Bewertung der Punkte als Ausreißer. Der Median der Rillungsqualität ist 0,96.

Die Abweichung von 1 bei der Rillungsqualität ist eine Summe aus Fertigungsungenauigkeiten gegenüber dem exakten theoretischen Verlauf und Messfehlern in der Aufzeichnung mit den LPS.

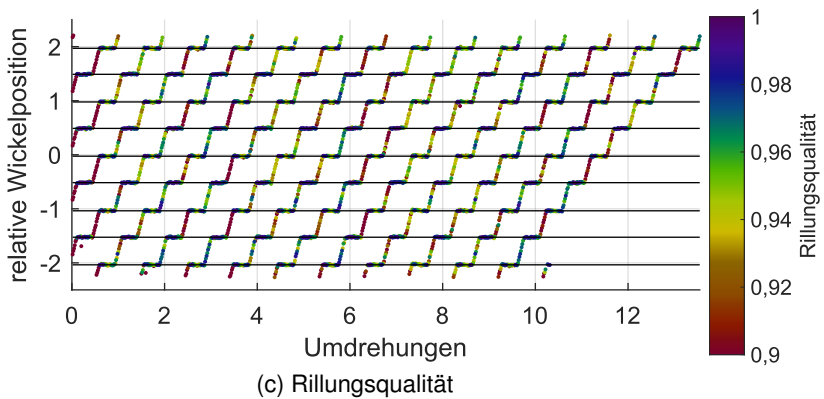
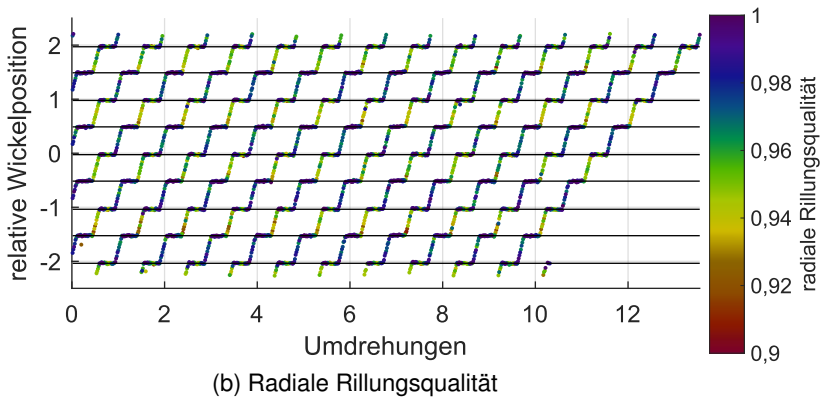
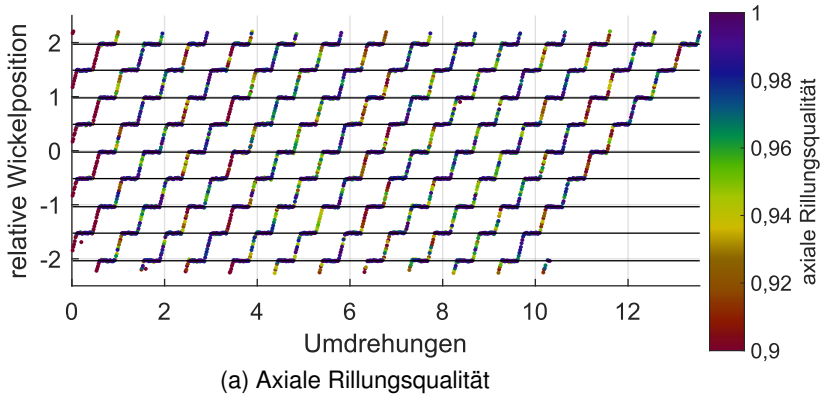


Abb. 5.5: Heatmap zu Trommel 1 mit Angabe der ermittelten PB

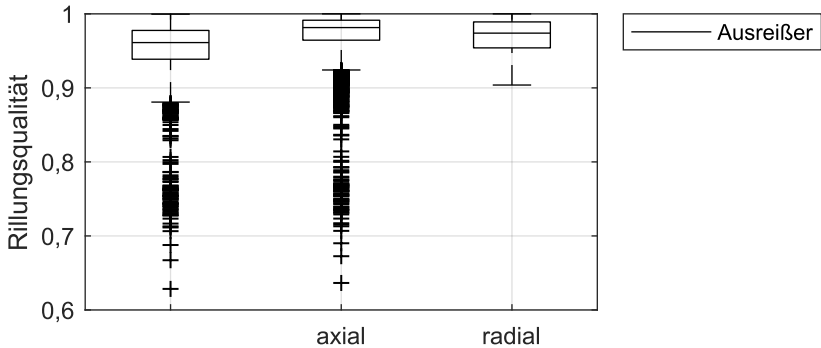


Abb. 5.6: Boxplot Rillungsqualität Trommel 1

Zur Untersuchung von Trommel 2.1 (Seil 2.1) wird durch die Kombination von drei LPS nahezu die komplette Trommellänge abgedeckt. Damit kann für Rillung und Wicklung über fast die vollständige Länge die Qualität bestimmt werden. In Abb. 5.7 ist der Boxplot der Rillungsqualität zu sehen. Diese Trommel hat eine niedrigere Übereinstimmung zwischen dem theoretischen und dem tatsächlichen Verlauf verglichen zu Trommel 1. Dies betrifft sowohl die axiale als auch die radiale Richtung. Insgesamt ergibt sich ein Median der Rillungsqualität von 0,93. Der niedrigere Wert kann auf eine geringere Fertigungsqualität im Vergleich zu Trommel 1 zurückzuführen sein. Ebenso ist es möglich, dass diese Trommel bei einem Experiment bis in den plastischen Bereich des Werkstoffs belastet wurde.

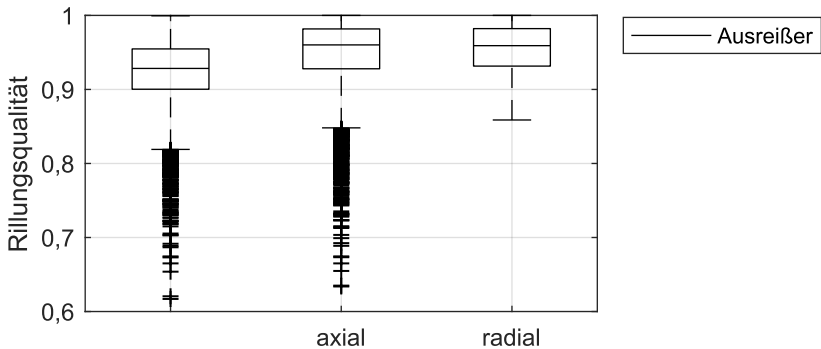


Abb. 5.7: Boxplot Rillungsqualität Trommel 2.1

In Abb. 5.8 ist die Wickelqualität für den Wickelverlauf aus Abb. 3.16a zu sehen. Die Bewertung der Qualität ist wieder zunächst in axialer und radialer Richtung und abschließend allgemein dargestellt. Aus dem Vergleich der drei Abbildungen wird ersichtlich, dass die allgemeine Wickelqualität maßgeblich durch die axiale Wickelqualität bestimmt wird.

Bereits in der ersten Lage (Umdrehungen ca. 10 bis ca. 60) ist eine schlechtere axiale Wickelqualität für die Umwicklungen bei den relativen Wickelpositionen (Soll) bei 0 und bei -1,5 zu erkennen. Dies deutet darauf hin, dass das Seil aufgrund eines zu großen maximalen Durchmessers an diesen Stellen nicht in die Rillung passt (vgl. Abb. 3.46a). In der zweiten Lage (Umdrehungen ca. 60 bis ca. 90) ist ein ähnliches Bild erkennbar. Wie in Kapitel 3.2.2 beschrieben hat die dritte Lage keine klar abgegrenzten PB. Dies spiegelt sich in der schlechteren Wickelqualität dieser Lage wider (Abb. 5.9b). Bereiche, die als PB funktionieren, liegen zum Teil genau zwischen denen von der Rillung vorgegebenen. Diese Stellen erscheinen in der Heatmap als Aneinanderreihung von roten Punkten immer um einen viertel Rillenabstand gegenüber der Soll-Position verschoben. In der vierten Lage sind die PB wieder besser besetzt. Die fünfte Lage weist zum Teil eine höhere und zum Teil eine schlechte Ordnung in den PB im Vergleich zur vierten Lage auf.

Die niedrigere Wickelqualität in axialer Richtung im Vergleich zur radialen ist auch in Abb. 5.9a zu sehen. Neben der deutlich schlechteren Wickelqualität in Lage drei ist eine Reduzierung der Wickelqualität im Verlauf der Lagen erkennbar. Die ersten beiden Lagen sind auf einem Niveau. Die vierte liegt leicht darunter und die fünfte noch ein weiteres Stück darunter (Abb. 5.9b).

Für das Drahtseil 2.1 ist die Wickelqualität in Abb. 5.10 zusammengefasst (die Auswertung bezieht sich im Gegensatz zur Abbildung auf nahezu die gesamte Trommellänge). In der Heatmap wird bereits deutlich, dass eine hohe Wickelqualität erzielt wird, da die PB gut auf den mithilfe der Rillung ermittelten schwarzen Linien liegen. Ab der vierten Lage sind vermehrt auch niedrigere Bewertungen erkennbar, weil die PB nicht mehr ganz so klar gegenüber den KB abgegrenzt sind.

Die allgemeine Wickelqualität weist einen hohen Wert von 0,86 auf. Dementsprechend ist auch die Wickelqualität der einzelnen Richtungen axial und radial gut (Abb. 5.10b).

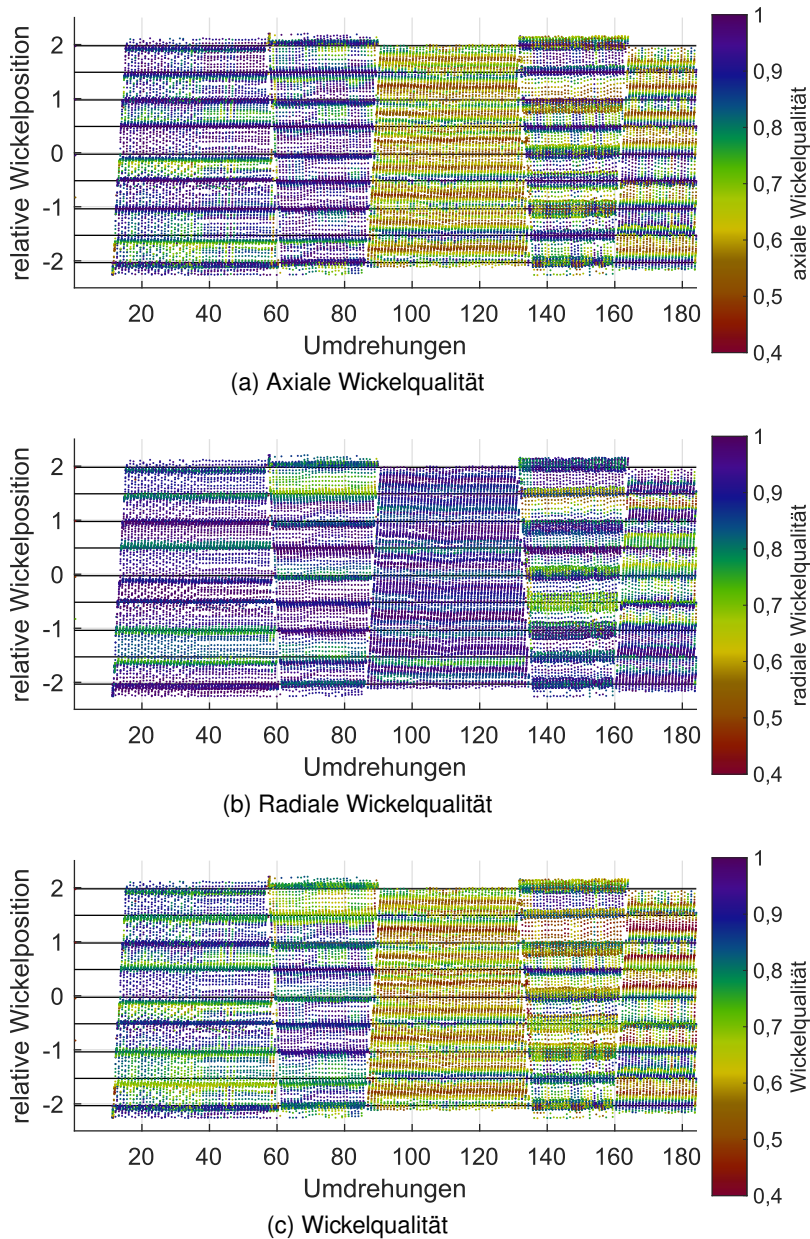


Abb. 5.8: Heatmap Wickelqualität Seil 1.3

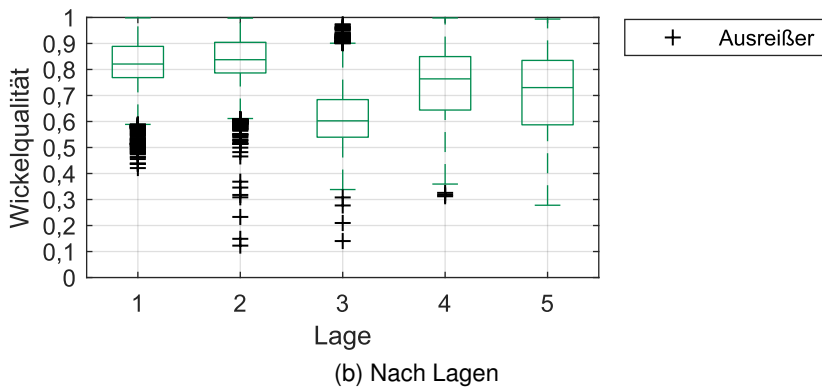
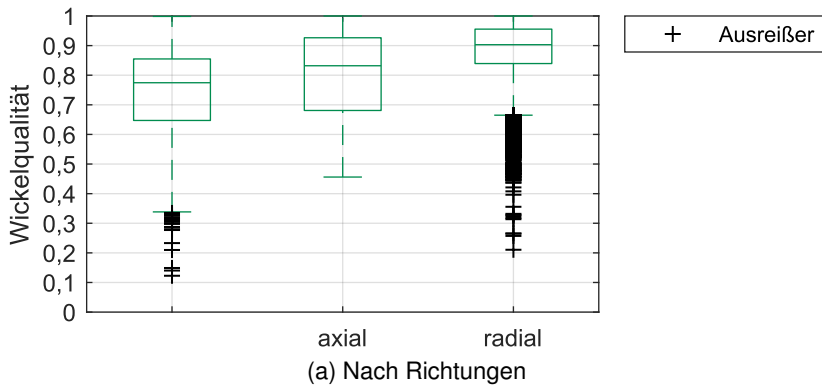


Abb. 5.9: Boxplot Wickelqualität Seil 1.3

Über den Verlauf von der ersten zur fünften Lage ist eine konstante Reduktion der Wickelqualität erkennbar (5.10c). Von 0,9 in der ersten geht die Wickelqualität auf 0,78 in der fünften herunter. Daran lässt sich die Wichtigkeit der guten Wicklung der unteren Lagen erkennen. Leichte Ungenauigkeiten in unteren Lagen führen nach oben hin zu immer stärkeren Abweichungen vom idealen Verlauf.

Seil 1.1 verläuft wie das Drahtseil gut in den PB. Aufgrund der realisierten Breite der PB ergibt sich jedoch in den höheren Lagen eine niedrigere Wickelqualität (Abb. 5.11a).

Bei der Auswertung des Boxplots von Seil 1.1 zeigt sich eine größere Abweichung zum theoretischen Verlauf in radialer Richtung. Das hat zwei Ursachen. Zum einen bewirkt die Breite des PB auch die Lage der Umwicklung in einer Höhe, die von der theoretischen abweicht. Zum anderen kann es keine perfekte Übereinstimmung des Modells mit dem tatsächlichen Verlauf geben. Da die Qualität gegenüber dem Modell berechnet wird, ergeben sich auch aus diesem Grund Abweichungen.

Der Verlauf der Wickelqualität verläuft qualitativ wie bei Seil 2.1. Es zeigt sich jedoch eine deutlich stärkere Reduzierung der Wickelqualität im Verlauf der Lagen.

In der Heatmap von Seil 1.2 fällt direkt die niedrigere Wickelqualität in den Lagen zwei bis fünf im Vergleich zu den bisher betrachteten Seilen auf. In der ersten Lage liegen einige Umwicklungen gut in den Rillen. Ähnlich wie bei Seil 1.3 sind jedoch besonders die Umwicklungen bei der relativen Wickelposition (Soll) 0,5 und -1,5 im PB verschoben. Ab der zweiten Lage sind keine klar abgegrenzten Bereiche mehr erkennbar. Dieses Verhalten zeigt sich auch im Boxplot der Wickelqualität der Lagen (Abb. 5.12c). Während in der ersten noch eine akzeptable Wickelqualität vorhanden ist, liegen die folgenden alle auf ungefähr der gleichen Höhe bei der Wickelqualität von 0,65.

Aus der Unterscheidung der Wickelqualität nach den Richtungen wird deutlich, dass der maßgebliche Anteil der niedrigen Wickelqualität auf einer schlechten Wickelordnung in axialer Richtung beruht (Abb. 5.12b).

Für Seil 1.4 liegen im betrachteten Bereich sowohl die radiale als auch die axiale Wickelqualität auf einem niedrigeren Niveau (Abb. 5.13b). Für den Wert der

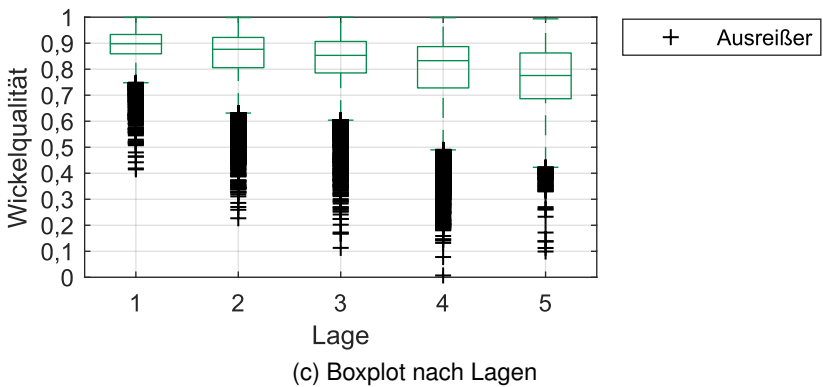
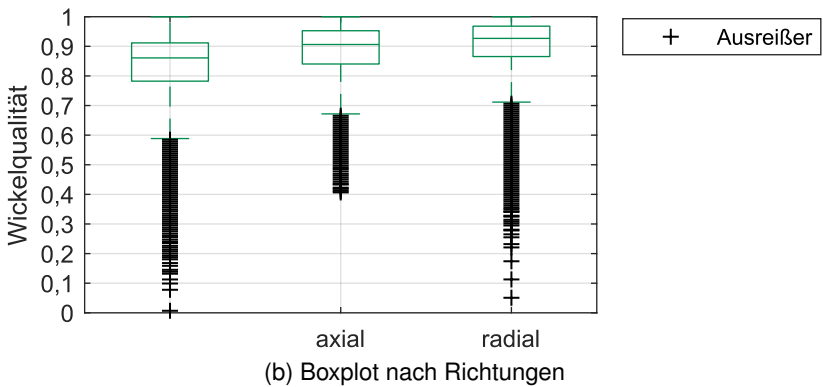
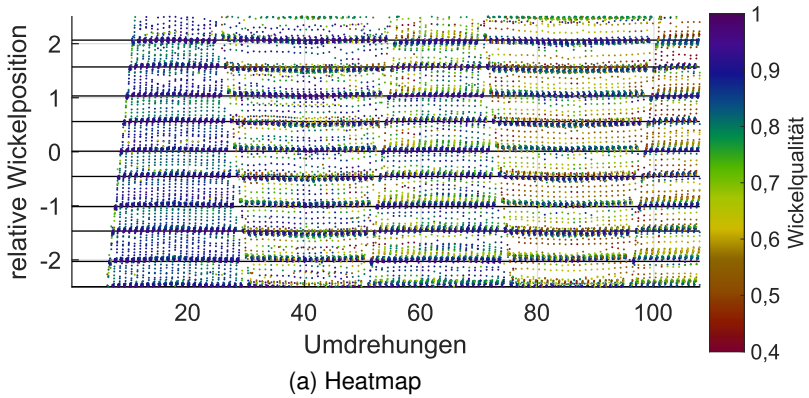


Abb. 5.10: Wickelqualität Seil 2.1

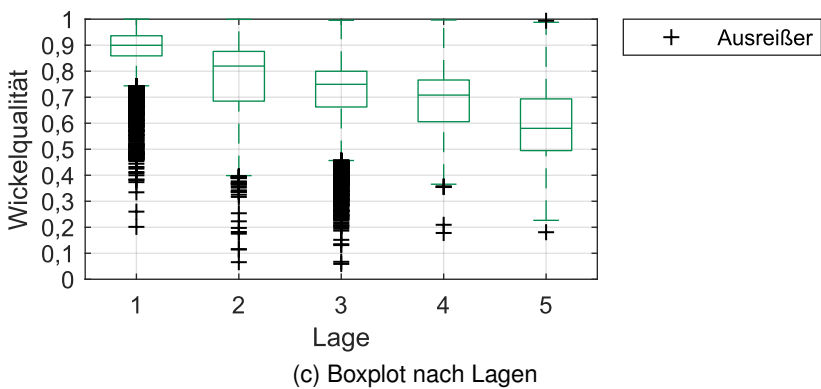
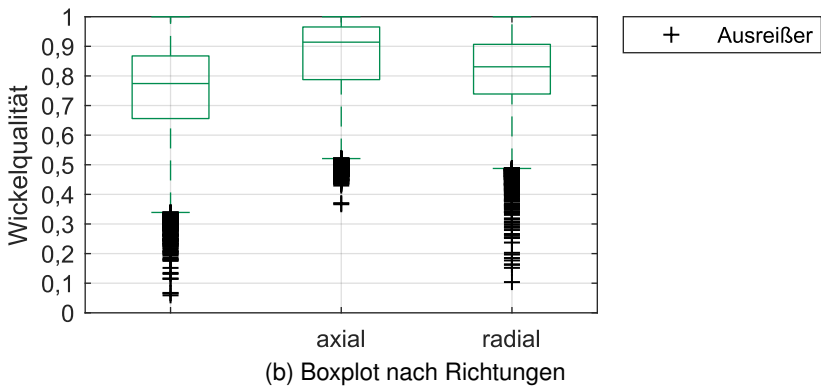
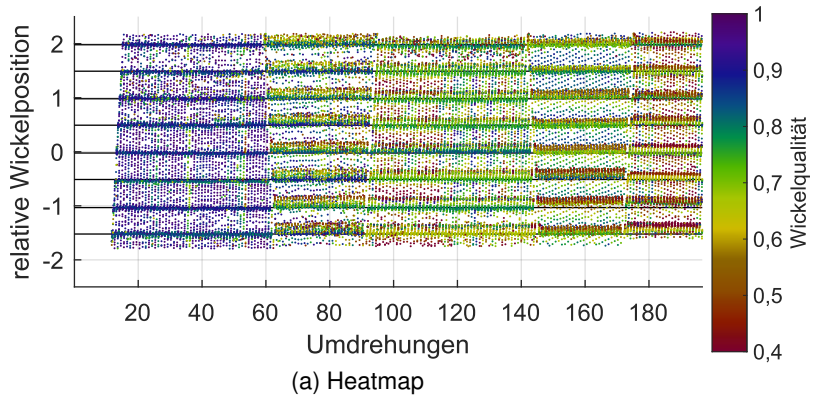


Abb. 5.11: Wickelqualität Seil 1.1

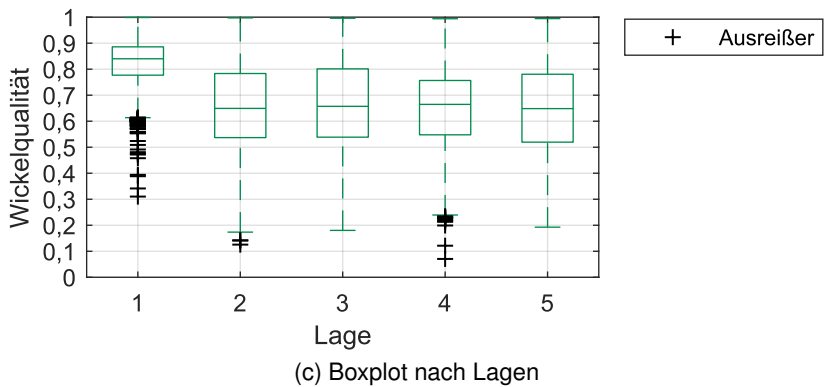
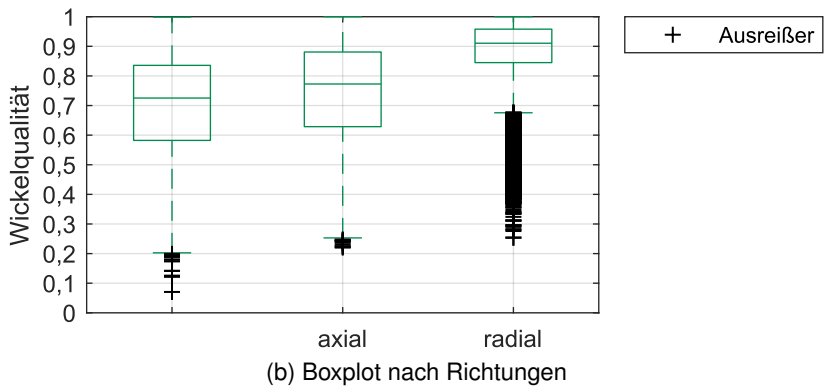
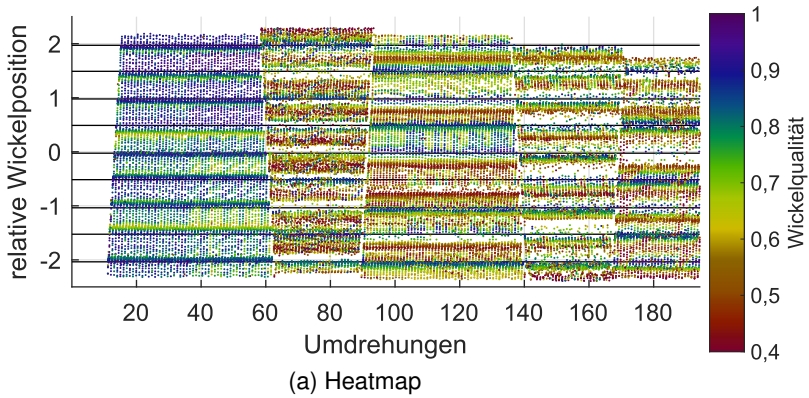


Abb. 5.12: Wickelqualität Seil 1.2

radialen Wickelqualität ist an dieser Stelle wieder zum einen die verschobene radiale Lage zu nennen. Diese ist bedingt durch die schlechtere axiale Ausrichtung der Umwicklungen. Zum anderen kommt auch wieder zum Tragen, dass das Modell keine perfekten Vergleichswerte liefern kann.

Im Verlauf der Lagen ist im Wesentlichen wieder die bereits gesehene Verschlechterung mit zunehmender Lagenzahl zu erkennen (Abb. 5.13c). Auffällig bei diesem Seil ist, dass es zuerst zu einer Verbesserung von der ersten zur zweiten Lage kommt. Erst anschließend tritt die Verschlechterung ein. In der fünften Lage ist letztendlich eine deutliche Verschlechterung auf eine Wickelqualität von 0,48 zu sehen. Dieses Ergebnis ist auch gut in der Heatmap erkennbar (Abb. 5.13a).

Von Seil 1.5 wird der Versuch mit dem eingeschnittenen Seil ausgewertet (vgl. Abb. 3.21b und Abb. 3.20b). In der Heatmap ist anhand der Verteilung und der Färbung der Punkte die schlechte Wickelqualität erkennbar. Bereits in der ersten Lage ist zwischen den PB der relativen Wickelpositionen 0,5 und -1 kein weiterer PB zu sehen. Somit hat das Seil für eine komplette Rillenbreite nicht den ordnungsgemäßen Platz in der Rille gefunden. Der maximale Seildurchmesser war in diesem Fall so groß, dass die vorherige Umwicklung so weit in die Nachbarrille hineinragte, dass die folgende Umwicklung aufgrund des fehlenden Platzes auf dem Rillensteg zu liegen kam. Wie auch in Abb. 3.21b zu sehen, hat sich dieses Ereignis aus der ersten Lage auf die Wickelordnung aller folgenden Lagen derart ausgewirkt, dass es zum Einschneiden der oberen Lagen in die unteren kam.

Im Boxplot (Abb. 5.14b) ist neben der schlechten allgemeinen Wickelqualität auch jeweils eine schlechte Wickelqualität für die axiale und die radiale Richtung zu sehen.

Da schon die erste Lage eine schlechte Wickelqualität aufweist, wird die Wickelqualität dieses Seils wie bei den vorherigen mit zunehmender Lagenzahl noch schlechter. Dies ist durch das vollständige Fehlen der Umwicklungen in den oberen Lagen begründet.

Die Heatmaps aller vorgestellten Seile auch nach axialer und radialer Richtung finden sich in Kapitel A.3.

In Abb. 5.15 sind die Werte für die Wickelqualität der untersuchten Seile noch

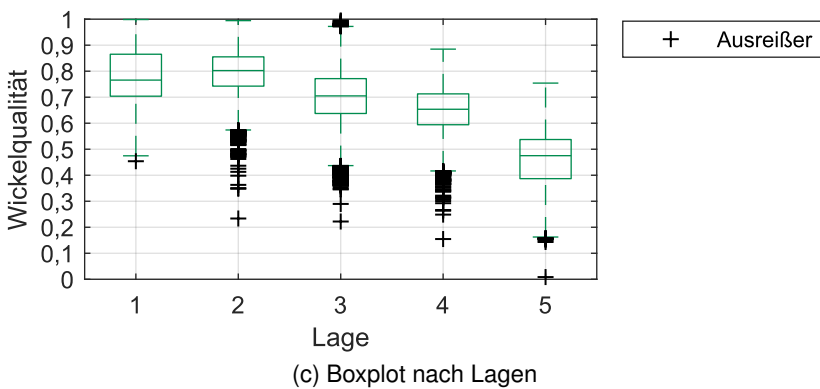
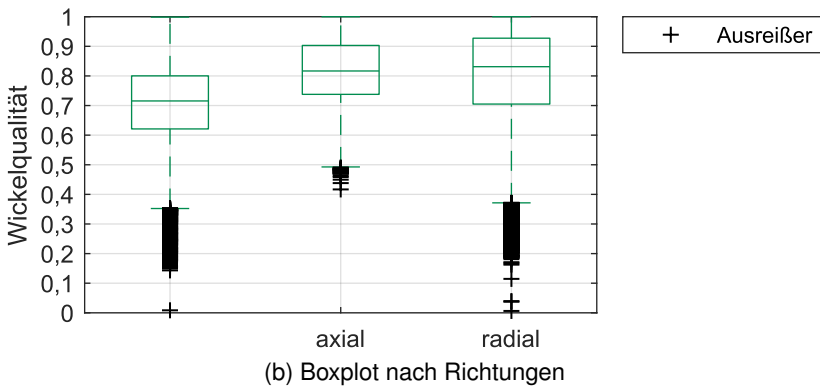
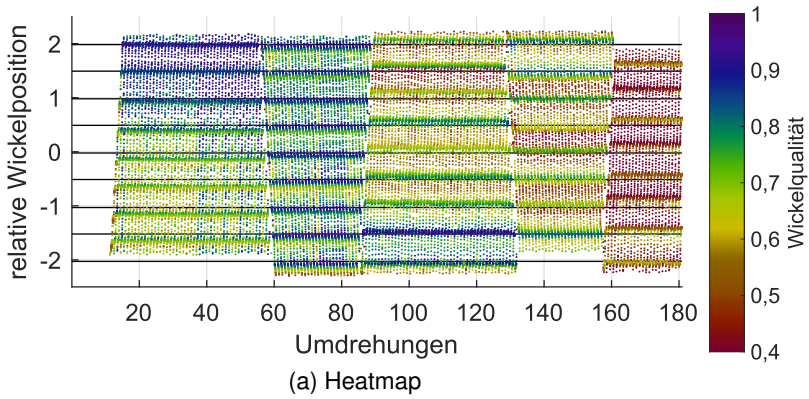


Abb. 5.13: Wickelqualität Seil 1.4

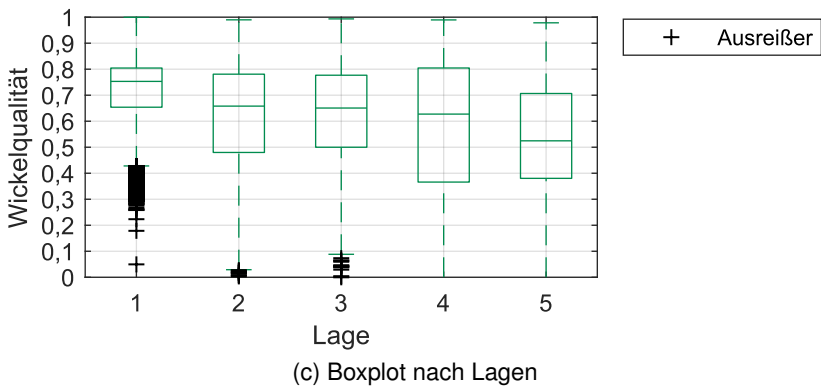
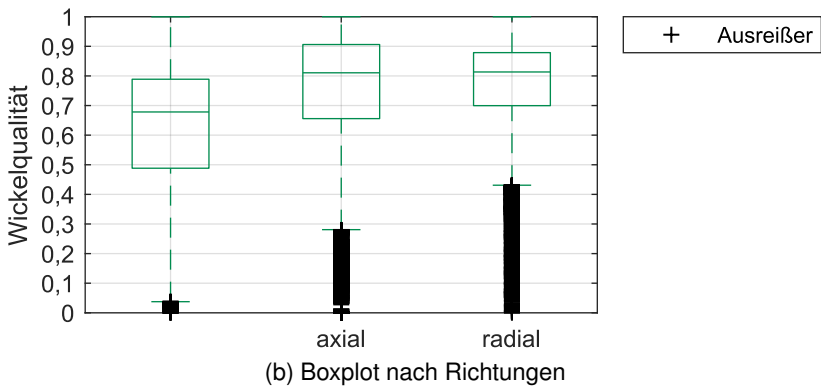
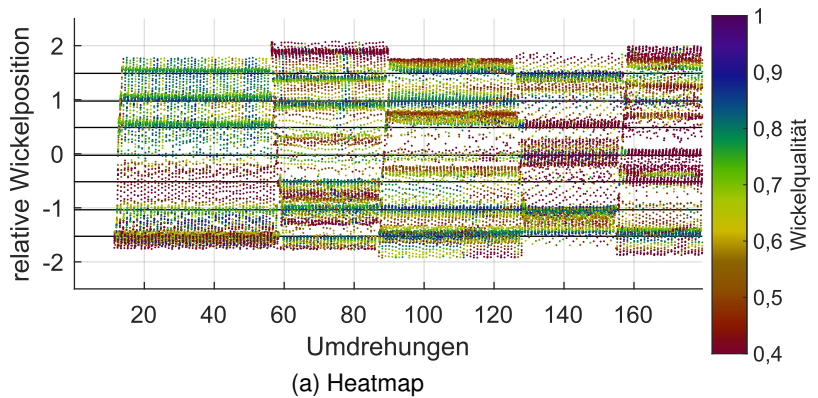


Abb. 5.14: Wickelqualität Seil 1.5

einmal zusammengefasst. Das Drahtseil 2.1 hat mit Abstand den höchsten Wert für die allgemeine Wickelqualität. Danach folgen mit einigem Abstand Seil 1.1 und Seil 1.3. Die restlichen Seile folgen mit weiterem Abstand.

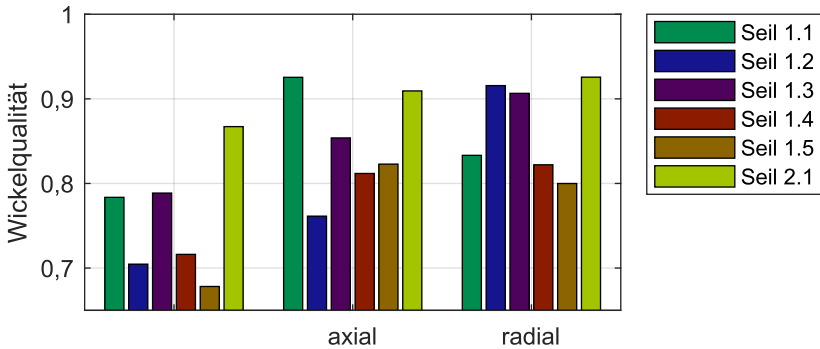


Abb. 5.15: Wickelqualität aller untersuchten Seile (wie bisher als Systemqualität eines Seils auf einer Trommel)

Eine gute axiale Wickelqualität konnte für Seile mit einer hohen Querschnittsstabilität erwartet werden (Seil 1.1, Seil 1.5 und Seil 2.1). Bei Ersterem und Letzterem ist dies auch eingetreten. Der Grund für die niedrigere axiale Wickelqualität von Seil 1.5 ist in dem zu großen Durchmesser für die verwendete Trommel 1 zu sehen. Von den weiteren Seilen 1.2, 1.3 und 1.4 fällt Seil 1.3 mit einer deutlich besseren axialen Wickelqualität auf. Dies ist darauf zurückzuführen, dass dieses Seil ohne die Durchführung einer Optimierung des Seildurchmessers für die Trommel bereits gut zur Rillung passt. Zum Ergebnis der radialen Wickelqualität sei an dieser Stelle noch einmal darauf hingewiesen, dass sich neben dem ausgewerteten Verlauf in dem Wert auch die Güte der Übereinstimmung mit der analytisch berechneten Wickelhöhe wiederfindet. Die hohen Werte für die radiale Wickelqualität von Seil 1.2 und Seil 1.3 sind zum Teil auch in der Tatsache der guten Übereinstimmung zwischen dem Modell und dem Experiment zu sehen (vgl. Kapitel 4.3).

Wird die Rillungsqualität aus dem Ergebnis herausgerechnet, wird die Wickelqualität für das Drahtseil von vorher 0,87 auf 0,94 erhöht.

Ein Wert oder ein Wertebereich für die Wickelqualität, der mit Faserseilen angestrebt werden sollte, kann aufgrund des geringen Umfangs der untersuchten Seile und Trommeln lediglich vorläufig festgelegt werden. Aufgrund des durch-

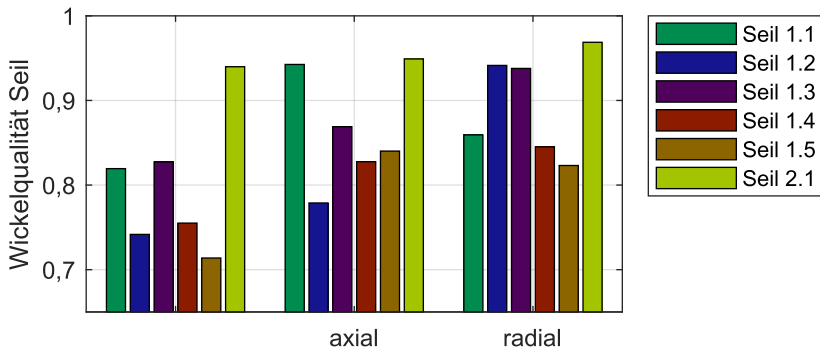


Abb. 5.16: Wickelqualität aller untersuchten Seile als Wickelqualität um Rillungsqualität bereinigt

geführten Vergleichs wird ein Bereich von 0,8 bis 0,85 für möglich gehalten. Da keines der vorgestellten Faserseile für die Trommel 1 speziell ausgelegt war, liegt in diesem Bereich noch Potenzial.

5.3 Wickelqualität – Zusammenfassung und Bewertung

Durch die Zusammenführung des Berechnungsmodells mit den experimentell ermittelten Daten können diese nun quantitativ analysiert werden. Bei der Bewertung der radialen Wickelqualität ist zu beachten, dass die Güte der Aussage über die Wickelqualität von der Güte der vorherigen Modellrechnung und den dafür verwendeten experimentell ermittelten Eingangsdaten abhängig ist.

Das Verfahren zur Bestimmung der Wickelqualität eignet sich besonders gut, um das System aus Seil und Trommel in der Entwicklung zu bewerten. Werden beispielsweise geringe Änderung an Seil oder Trommel vorgenommen, können diese durch den Vergleich der erzielten Wickelqualitäten quantifiziert werden. Auch bei Langzeitversuchen mit gleichbleibendem System kann auf diese Weise eine Veränderung des Aufbaus des Wickelpakets erkannt werden.

Wie bei Trommel 2.1 durchgeführt, kann durch den Einsatz mehrerer LPS die untersuchbare Breite erhöht werden. Durch dieses Vorgehen wäre es möglich, beispielsweise bei besonders sicherheitsrelevanten Anwendungen eine dauerhafte Überwachung der Mehrlagenwicklung im Einsatz durchzuführen.

6 Anwendung der Ergebnisse

Abschließend wird in diesem Kapitel gezeigt, wie das vorgestellte Verfahren zur Analyse von Seil, Seiltrommel und Wickelverhalten genutzt wird. Zuerst wird ein Beispiel vorgestellt, wie spezielle Wickelvorgänge analysiert werden. Anschließend wird erläutert, wie das Wissen um den Seilquerschnitt und den Lagenaufbau dazu eingesetzt werden kann, um Seil und Trommel aufeinander abzustimmen. Dabei können Anpassungen des Seils an die Trommel und Anpassungen der Trommel an das Seil vorgenommen werden. Idealerweise wird ein Gesamtsystem aus Seil und Trommel in wechselseitiger Anpassung entwickelt.

6.1 Anwendung der Wickelqualitätsanalyse

Dieses Kapitel beschreibt, wie die Wickelqualitätsanalyse neben den vorgestellten Ausführungen auch noch detaillierter durchgeführt werden kann. Zuerst wird die Wickelqualität für den gesamten Wickelvorgang wie bereits gesehen nach Richtungen (radial, axial und allgemein) und Lagen bewertet. Anschließend wird die Veränderung der Wickelqualität bestimmter Umwicklungen je Umdrehung während der weiteren Bewicklung beleuchtet. Dazu wird zuerst der Verlauf der Umwicklungen in axialer und radialer Trommelrichtung mit Angabe der allgemeinen Wickelqualität beschrieben. Dieselben Umwicklungen werden anschließend mithilfe von Boxplots pro Umdrehung bewertet.

Ein gutes mehrlagiges Wickelpaket lässt sich erreichen, wenn das Seil mit einem hohen Anteil der zulässigen Seilkraft aufgewickelt wird. Dies ist an Land immer dann der Fall, wenn Bauten errichtet werden. Es wird eine Last gehoben und damit das Seil im belasteten Zustand aufgewickelt. Mit niedriger Belastung wird das Seil anschließend wieder abgewickelt, um den Vorgang zu wiederholen.

Der umgekehrte Fall tritt zum einen im Offshorebereich und zum anderen zunehmend an Land bei der Demontage von Windkraftanlagen auf. Das Seil wird ohne wesentliche Seilkraft aufgewickelt. Der Vorgang des Senkens der Last wird anschließend mit hoher Seilkraft durchgeführt.

Ein ähnlicher Vorgang wird mit dem in Kapitel 5.2.1 vorgestellten Verfahren analysiert und bewertet. Die Wicklung wird mit Seil 2.1 und Trommel 2.1 durchgeführt. Die zwei untersuchten Wickelszenarien sind:

- Wickelszenario 1: Das Seil wird in allen Lagen mit der hohen Seilkraft $F_L = 25 \% \cdot MBF$ gewickelt.
- Wickelszenario 2: Das Seil wird in den ersten beiden Lage mit der geringen Seilkraft $F_{L,1,2} = 2 \% \cdot MBF$ und in den folgenden Lagen drei bis fünf mit der hohen Seilkraft $F_{L,3,4,5} = 25 \% \cdot MBF$ gewickelt.

Wie auch in den in Kapitel 5.2.2 vorgestellten Ergebnissen wird ca. 90 % Trommellänge durch LPS aufgenommen und damit der Beurteilung zugänglich gemacht. Die Bewertung der Rillungsqualität hat die gleichen Ergebnisse wie im vorherigen Experiment ergeben (vgl. Abb. 5.7).

Die bereits gezeigten Werte für die Wickelqualität nach Richtungen und nach Lagen (vgl. Abb. 5.10) werden den Ergebnissen aus dem Wickelszenario 2 gegenübergestellt. In Abb. 6.1 wird die Wickelqualität (WQ) für beide kompletten Versuche gezeigt. In dieser integralen Darstellung ist erkennbar, dass die niedrigere allgemeine Wickelqualität aus einer Verschlechterung der Wickelqualität in radialer Richtung resultiert. Die axiale Wickelqualität ist in beiden Varianten auf dem gleichen Niveau. Insgesamt verschlechtert sich die Wickelqualität durch das lockere Wickeln der ersten beiden Lagen von 0,86 im Wickelszenario 1 auf 0,77 im Wickelszenario 2.

Es ist interessant, dass es in der ersten Lage auch bei Wickelszenario 2 eine verhältnismäßig gute Wickelqualität gibt (Abb. 6.2). Von 0,9 sinkt der Wert der Wickelqualität lediglich leicht auf 0,88. Dieses Verhalten ist durch den Einfluss der Rillen zu erklären. Auch die geringe Seilkraft drückt das Seil ausreichend fest hinein, dass die gewünschte Führung erreicht wird. Anders verhält sich die Wickelqualität in den folgenden Lagen zwei bis fünf. Im Gegensatz zur leichten Reduzierung der Wickelqualität von Lage zu Lage auf einen Wert von 0,78, stellt sich eine deutliche Reduzierung sofort in Lage zwei ein. Die Lagen zwei,

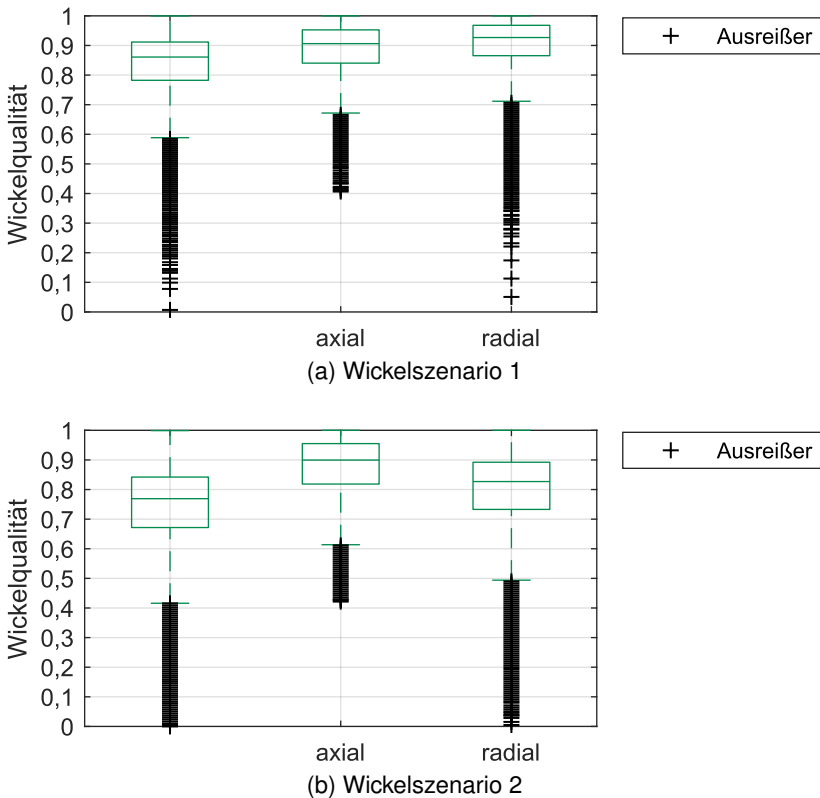


Abb. 6.1: Boxplot Wickelqualität Seil 2.1 nach Richtungen

vier und fünf liegen auf einem Niveau von 0,73 bis 0,74. Lediglich die Lage drei weist einen etwas höheren Wert von 0,77 auf.

Wie in Kapitel 5.2.1 beschrieben kann die Wickelqualität auch für noch kleinere Bereiche der Wicklung als die Lagen ausgewertet werden. In der weiteren Auswertung werden zwei ausgewählte Umwicklungen an den relativen Wickelpositionen 0,0 bis 0,5 und 8,6 bis 9,1 betrachtet (Abb. 6.3). Eine Position umfasst immer einen PB mit je einem halben KB vor- und nachher. Zusammen ergeben zwei nebeneinanderliegende Positionen eine Umwicklung.

Der in Abb. 6.3 eingezeichnete Wickelverlauf zeigt für jede Lage die Laufrichtung des Seils. Jeweils neben den Bordscheiben steigt das Seil von der Trom-

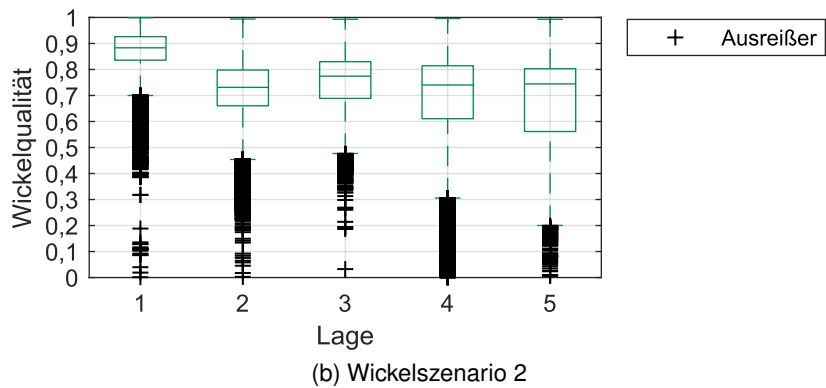
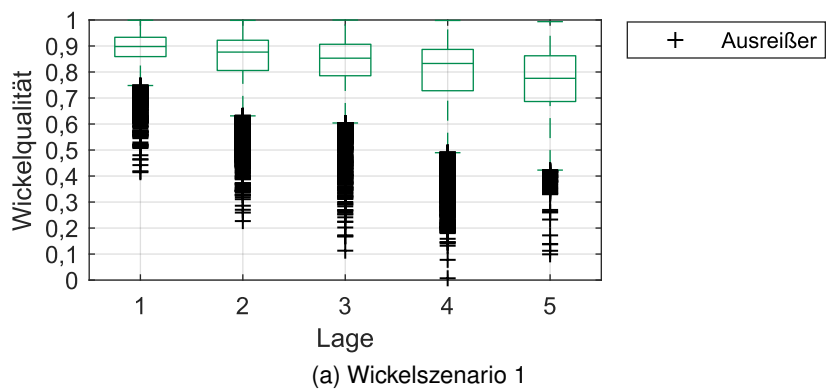


Abb. 6.2: Boxplot Wickelqualität Seil 2.1 nach Lagen

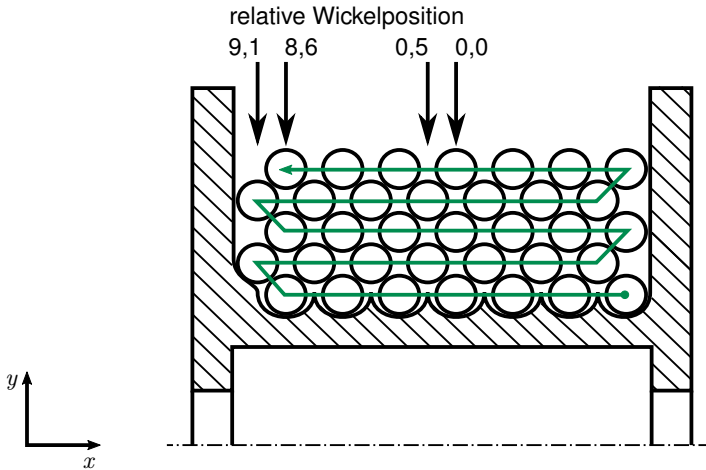


Abb. 6.3: Querschnitt des Wickelpaketes mit Angabe des Wickelverlaufs und der Wickelpositionen zur weiteren Auswertung

mel aus gesehen in die nächste Lage auf. Jede Lage hat in dieser Sichtweise gleich viele Umwicklungen. Dieser Lagenwechsel wird mit LW_T bezeichnet. Mit zusätzlichen Indizes wird angegeben, von welcher zu welcher Lage gewechselt wird. Der Lagenwechsel von der ersten zur zweiten wird mit $LW_{T,1,2}$ bezeichnet.

Wenn im Gegensatz dazu eine Beobachtungsstelle an einer bestimmten Wickelposition eingenommen wird, wie dies durch die Aufnahmen der LPS der Fall ist, ergeben sich die Lagenwechsel zu anderen Zeitpunkten. In der Mitte der Trommel ist der Lagenwechsel immer genau zwischen den Lagenwechseln der Trommel (LW_T) sichtbar (vgl. beispielsweise Abb. 6.4). Jeder Lagenwechsel ist gleichmäßig um die Wickeldauer einer halben Lage verschoben. Wenn die Beobachtungsposition von der Mitte abweicht, ergeben sich unterschiedlich lange Beobachtungszeiten der geraden und ungeraden Lagen. Am extremsten ist die Verschiebung der Lagenwechsel direkt neben einer Bordscheibe beispielsweise an der relativen Wickelposition 9,1. Hier sind nahezu nur die geraden Lagen zu sehen. Kaum sind die ungeraden gewickelt, werden sie direkt von der nächsten geraden Lage wieder verdeckt (vgl. beispielsweise Abb. 6.6). Diese Lagenwechsel werden mit LW_P bezeichnet. Die Angabe der wechselnden Lagen erfolgt analog zum Trommellagenwechsel LW_T .

Die in Abb. 6.3 angegebenen Wickelpositionen werden in den folgenden Abbildungen näher analysiert. Es wird jeweils eine Umwicklung an zwei verschiedenen Stellen der Trommel betrachtet. Die Position in der Mitte der Trommel dient als Referenz. An der Position der linken Bordscheibe ist die obere locker gewickelte Lage am längsten offen. Zudem ergeben sich an dieser Stelle die stärksten Auswirkungen der lockeren Wicklung.

In Abb. 6.4 ist die allgemeine Wickelqualität für beide Wickelszenarien in der Trommelmitte dargestellt. Zu sehen ist die Ansicht des Wickelverlaufs der axialen Trommelrichtung. Im Vergleich der beiden Wickelszenarien ist erkennbar, dass der Verlauf der Umwicklungen für die Standardbewicklung des Wickelszenarios 1 über alle Lagen gleichmäßig in leichten Wellen von $P_{x,rel} = 0,1$ verläuft (Abb. 6.4a). Zum Lagenwechsel auf der Trommel LW_T ändert sich jeweils die Richtung der Welle. Dies liegt daran, dass sich zur neuen Lage die axiale Wickelrichtung des Seils zur anderen Bordscheibe hin ändert. Die betrachtete Umwicklung wird damit auch in die andere Richtung geschoben.

Im Gegensatz zum Wickelszenario 1 verläuft die erste Lage im Wickelszenario 2 an dieser Wickelposition ohne die beschriebenen Wellen (Abb. 6.4b). Die zweite Lage verläuft bis zum Trommellagenwechsel $LW_{T,2,3}$ zunächst ebenfalls gleichmäßig. Zeigt jedoch eine etwas größere Streuung in axialer Richtung ($P_{x,rel} = 0,1$). An Wickelposition 0,5 ist die Umwicklung um $P_{x,rel} = 0,05$ gegenüber der ersten Lage versetzt. Dies liegt an der geringeren Seilkraft, die das Seil nicht ausreichend fest in das Tal der ersten Lage legt. Ab dem Lagenwechsel $LW_{T,2,3}$ zur dritten Lage beginnt sich die bereits gewickelte zweite Lage in die positive axiale Richtung zu verschieben. Die dritte Lage verläuft im Anschluss etwas gleichmäßiger. Auch nach dem sichtbaren Lagenwechsel $LW_{P,3,4}$ zur vierten Lage ist der Verlauf zunächst gleichmäßiger. Der Wechsel zur fünften Lage $LW_{T,4,5}$ ist wieder gut erkennbar. Insgesamt verläuft die Umwicklung ab der vierten Lage wieder ähnlich wie im Wickelszenario 1.

Der radiale Wickelverlauf in Wickelszenario 1 ist über alle Lagen gleichmäßig. Die Lagenwechsel des Seils auf der Trommel LW_T haben keinen sichtbaren Einfluss auf den Wickelverlauf.

Der Effekt, dass die Umstellung von der geringen zur hohen Seilkraft von der zweiten zur dritten Lage ($LW_{T,2,3}$) im Wickelszenario 2 eine Auswirkung hat, ist in Abb. 6.5b im Wickelverlauf in radialer Richtung zu sehen. Der Verlauf der

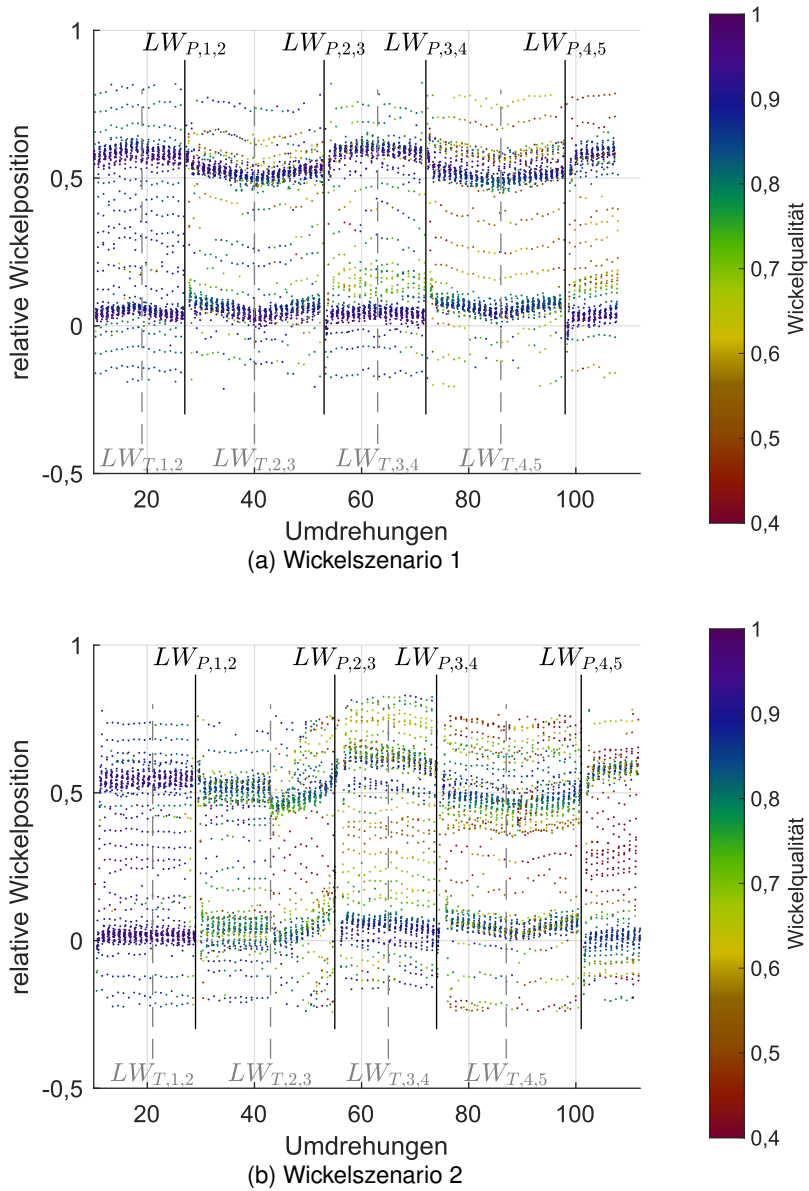


Abb. 6.4: Vergleich der Wickelqualität verschiedener Wickelszenarien in der Trommelmitte in der $x - \varphi$ -Ebene

Wickelhöhe ist ab diesem Zeitpunkt weniger gleichmäßig als zuvor in der zweiten Lage. Auch der Lagenwechsel auf der Trommel zur fünften Lage ($LW_{T,4,5}$) ist in dieser Darstellung sichtbar. Nach dem Lagenwechsel ist eine schlechtere Wickelqualität erkennbar. Insgesamt sind jedoch an diesen zwei Wickelpositionen in der Wickelhöhe nur leichte Abweichungen durch die Umstellung von Wickelszenario 1 auf 2 erkennbar.

Abb. 6.6 zeigt wieder die Wickelqualität in der Ansicht der axialen Wickelposition; nun aber an der Wickelposition neben der Bordscheibe. Wie beschrieben sind hier die zweite und die vierte Lage zu sehen. Der Verlauf der Wicklung stellt sich in Wickelszenario 1 gleichmäßig mit den bekannten Wellen dar (Abb. 6.6a).

Im Wickelszenario 2 ist der Effekt auf die gewickelte zweite Lage durch die Erhöhung der Seilkraft beim Wechsel zu Lage drei ($LW_{T,2,3}$) deutlich zu erkennen (Abb. 6.6b). Initial wird die Umwicklung in die negative axiale Richtung geschoben. Im Zuge der weiteren Bewicklung wird sie wieder in die entgegengesetzte Richtung verschoben. Bei der vierten Lage ist vor allem an der relativen Wickelposition 9,1 eine deutliche Veränderung gegenüber Wickelszenario 1 erkennbar. Das Seil bewegt sich trotz der Soll-Position im PB deutlich in axialer Richtung. Dies zeigt sich an der größeren Streuung der Werte in axialer Richtung.

In Abb. 6.7 ist die Wickelqualität im radialen Wickelverlauf neben der Bordscheibe zu sehen. Im Wickelszenario 1 hat der Lagenwechsel des Seils auf der Trommel wiederum keinen sichtbaren Einfluss (Abb. 6.7a).

Beim Lagenwechsel $LW_{T,2,3}$ in Wickelszenario 2 ist zunächst eine leichte Veränderung in der Wickelqualität erkennbar (Abb. 6.7b). Mit fortschreitender Überwicklung der zweiten mit der dritten Lage vergrößert sich die Wickelhöhe in einem KB. Dies wird neben der Lage auch an der Färbung der Punkte sichtbar. Im Vergleich der vierten Lagen der beiden Wickelszenarien ist eine höhere Ordnung bei Wickelszenario 1 erkennbar. Neben der undeutlichen Ausprägung der KB im Fall von Wickelszenario 2 ist dies wiederum an der entsprechenden Färbung zu sehen.

In der qualitativen Beurteilung der Wickelverläufe für die beiden Wickelszenarien haben sich deutliche Unterschiede gezeigt. Daher wird für dieselben Positionen die quantitative Wickelqualität je Umdrehung $WQ_{l,u,d}$ untersucht (vgl.

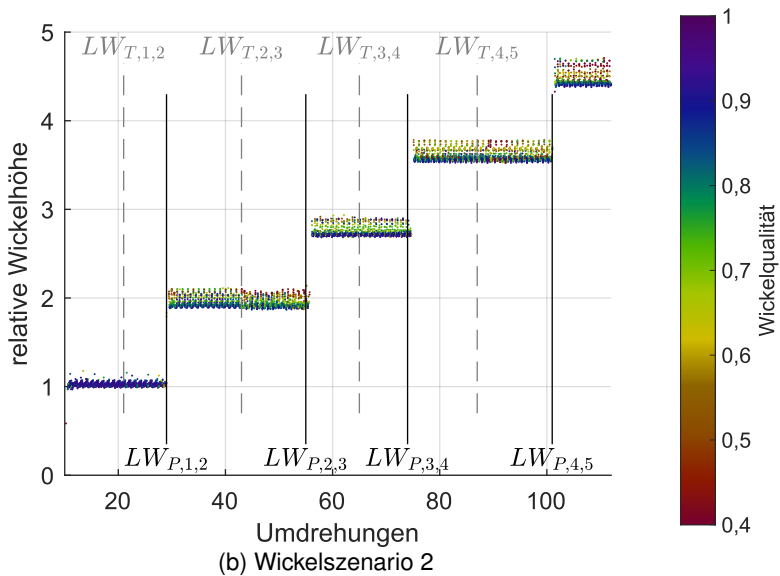
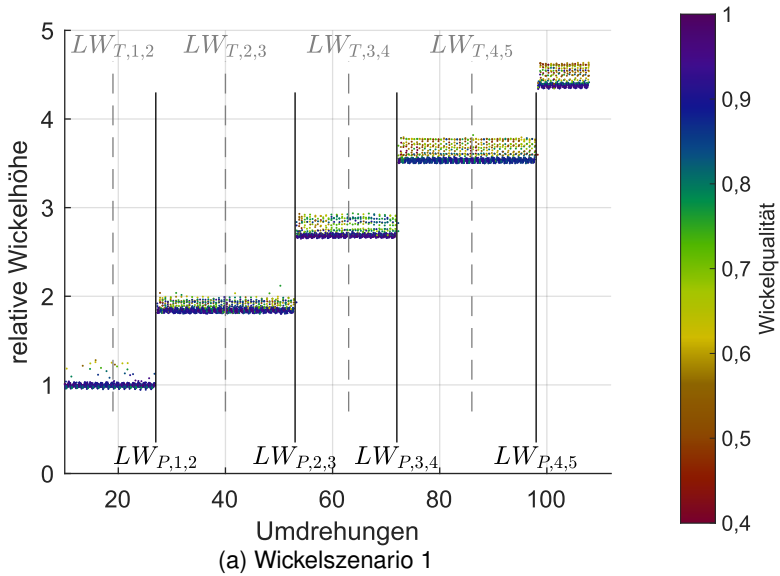


Abb. 6.5: Vergleich der Wickelqualität verschiedener Wickelszenarien in der Trommelmitte in der $y - \varphi$ -Ebene

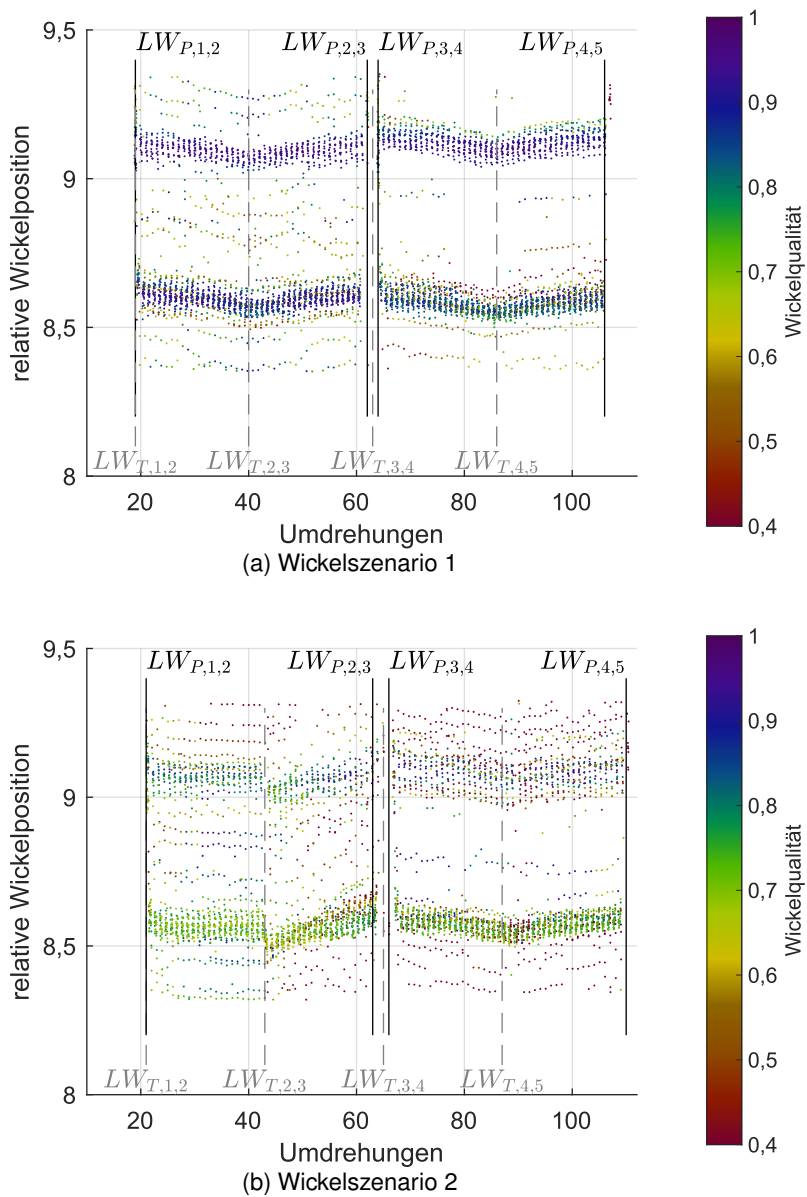


Abb. 6.6: Vergleich der Wickelqualität verschiedener Wickelszenarien neben der Bordscheibe in der $x - \varphi$ -Ebene

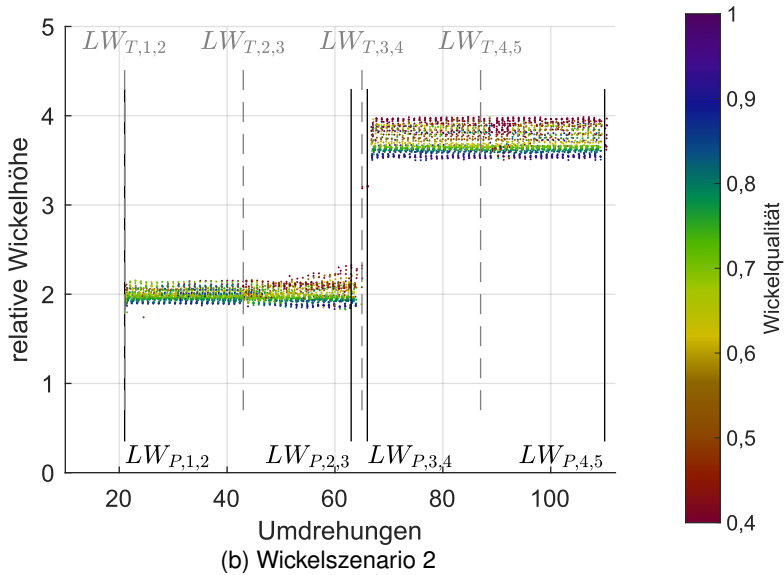
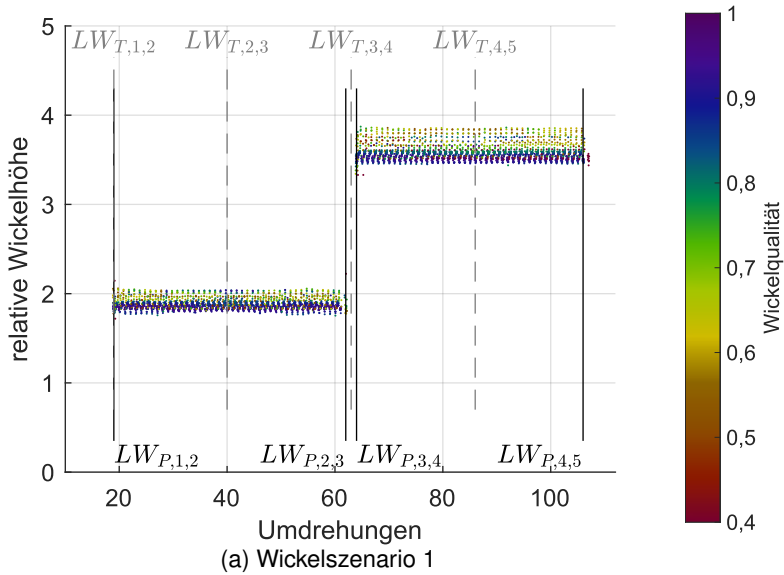


Abb. 6.7: Vergleich der Wickelqualität verschiedener Wickelszenarien neben der Bordscheibe in der $y - \varphi$ -Ebene

Gleichung (5.13)). Zur übersichtlicheren Darstellung werden in Abb. 6.8 bis Abb. 6.11 nicht einzelne Boxplots je Umdrehung dargestellt. Stattdessen sind dieselben relevanten Punkte je Umdrehung nach folgender Benennung

- a_o oberer Anrainer (oberer Whisker),
- q_3 oberes Quartil,
- q_2 Median,
- q_1 unteres Quartil und
- a_u unterer Anrainer (unterer Whisker)

verbunden (vgl. Kapitel 2.6). Außerdem sind die Umdrehungen angegeben, zu denen der Lagenwechsel auf der Trommel (LW_T) und an der betrachteten Stelle stattfindet (LW_P).

Die Umwicklung in der Mitte der Trommel ist in Abb. 6.8 und Abb. 6.9 zu sehen. Die Wickelqualität für das Wickelszenario 1 beginnt bei ungefähr 0,9 und geht teilweise bis auf 0,85 bis 0,8 hinunter (Median q_2 Abb. 6.8a und Abb. 6.9a).

Es zeigt sich, dass für die ganze Umwicklung an den relativen Wickelpositionen 0,0 (Abb. 6.8a) und 0,5 (Abb. 6.9a) die Lagen eins und drei in etwa gleich verlaufen. Die Wickelqualität beginnt auf einem höheren Niveau ($LW_{P,0,1}$ bei Umdrehung 0 (nicht eingezeichnet) und $LW_{P,2,3}$). Bis zum Lagenwechsel auf der Trommel ($LW_{T,1,2}$ und $LW_{T,3,4}$) sinkt sie leicht ab, um anschließend wieder auf das Ausgangsniveau zu steigen. Die fünfte Lage verhält sich auch ähnlich. Es gibt einen abnehmenden Verlauf (ab $LW_{P,4,5}$). Da jedoch keine Wechsel zur sechsten Lage stattfindet, fehlt der anschließende steigende Verlauf.

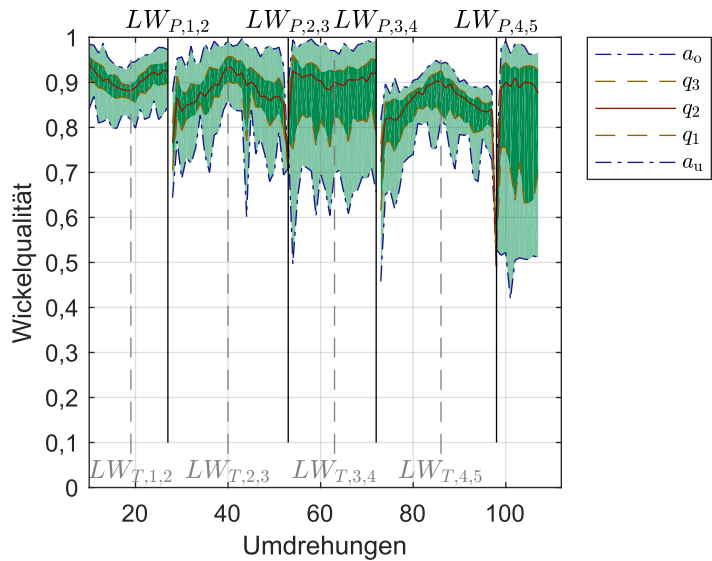
In den Lagen zwei und vier verhält sich die Wickelqualität dagegen an den relativen Wickelpositionen 0,0 und 0,5 gegenläufig. An der relativen Wickelposition 0,5 (Abb. 6.9a) zeigt sich wieder zuerst ein fallender (ab $LW_{P,1,2}$ und $LW_{P,3,4}$) und anschließend ein steigender Verlauf (ab $LW_{T,2,3}$ und $LW_{T,4,5}$). An der relativen Wickelposition 0,0 folgt auf eine anfängliche Steigerung der Wickelqualität (ab $LW_{P,1,2}$ und $LW_{P,3,4}$) eine Abnahme nach dem Lagenwechsel auf der Trommel (ab $LW_{T,2,3}$ und $LW_{T,4,5}$). Die Veränderungen der Wickelqualität bereits gewickelter Lagen kann auf Bewegungen des Seils durch die weitere Bewicklung zurückgeführt werden. Die gegenläufige Veränderung der Wickelqualität benachbarter relativer Wickelpositionen wird durch eine Lockerung auf der abnehmenden und ein Festziehen der Umwicklung auf der zunehmenden Seite der Trommel verursacht.

Das Wickelszenario 2 weist wie bereits zuvor gesehen niedrigere Werte für die Wickelqualität auf (Abb. 6.8b und Abb. 6.9b). Die erste Lage hat an beiden Wickelpositionen eine gleichmäßig hohe Wickelqualität. Mit Beginn der zweiten Lage an den Wickelpositionen ($LW_{P,1,2}$) sinkt diese sofort auf ein konstantes niedrigeres Niveau ab. Der Beginn der Bewicklung der dritten Lage auf der Trommel mit der höheren Seilkraft ($LW_{T,2,3}$) verschlechtert die Wickelqualität nochmals. An der relativen Wickelposition 0,0 tritt eine kontinuierliche Verschlechterung ein (Abb. 6.8b ab $LW_{T,2,3}$). Die für das Wickelszenario 1 beschriebenen Veränderungen der Wickelqualität sind für die beiden Wickelpositionen in der Mitte der Trommel für die Lagen drei, vier und fünf mit einer schwächeren Ausprägung ebenfalls erkennbar. Die Streuung der Werte der Wickelqualität ist im Wickelszenario 2 deutlich höher.

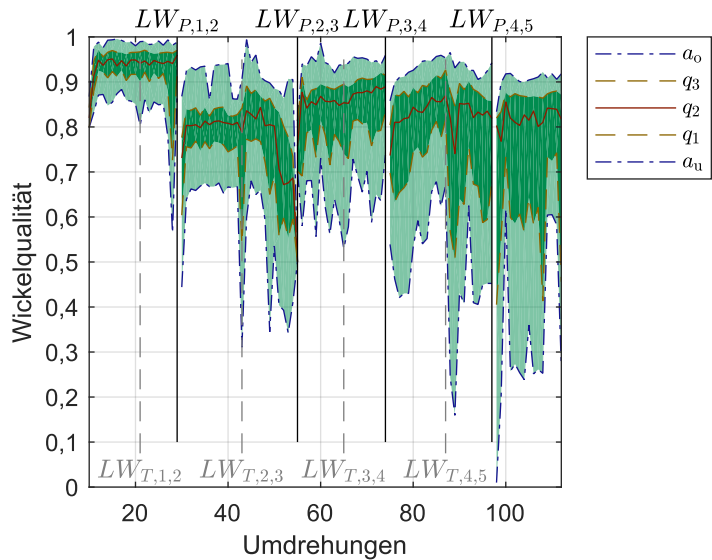
Für die Wickelpositionen neben der Bordscheibe zeigen sich auch für das Wickelszenario 1 Unterschiede zwischen den relativen Wickelpositionen 8,6 und 9,1. An der relativen Wickelposition 8,6 (Abb. 6.10a) liegt der Median der Wickelqualität niedriger im Vergleich zur relativen Wickelposition 9,1 (Abb. 6.11a). Auch die Streuung ist an der erstgenannten Position deutlich größer. Dieses Verhalten ist dadurch bedingt, dass sich das Seil an dieser Stelle im Aufstieg in die nächste Lage befindet ($LW_{T,P,1,2}$ und $LW_{T,P,3,4}$). Dadurch ist die Umwicklung an dieser Stelle je nach Winkelposition der Trommel unterschiedlich gut geführt. Eine ausgeprägte Veränderung der Wickelqualität während der weiteren Bewicklung ist nicht erkennbar.

Beim Blick auf das Wickelszenario 2 ergeben sich in beiden Bereichen Veränderungen. An der relativen Wickelposition 8,6 ist eine Verringerung der Wickelqualität erkennbar. Die Streuung wird jedoch leicht reduziert (Abb. 6.10b). Anders ist es an der relativen Wickelposition 9,1. Neben der deutlichen Reduzierung der Wickelqualität nimmt die Streuung in der zweiten Lage deutlich und in der vierten sehr stark zu (Abb. 6.11b). Dieses schlechte Wickelverhalten liegt an einer Überlänge des Seils, welches aus den locker gewickelten ersten beiden Lagen durch die dritte zusammengeschoben wird. Dies zeigt sich in der Verschlechterung zwischen den Trommellagenwechseln $LW_{T,2,3}$ und $LW_{T,3,4}$ (vgl. radialer Verlauf Abb. 6.7b). In der vierten Lage wird das Seil nun über das ungleichmäßige Wickelpaket gewickelt und verläuft daher selber sehr ungleichmäßig ($LW_{P,3,4}$ bis $LW_{P,4,5}$).

Das Werkzeug der Wickelqualitätsanalyse bietet in der vorgestellten Anwen-

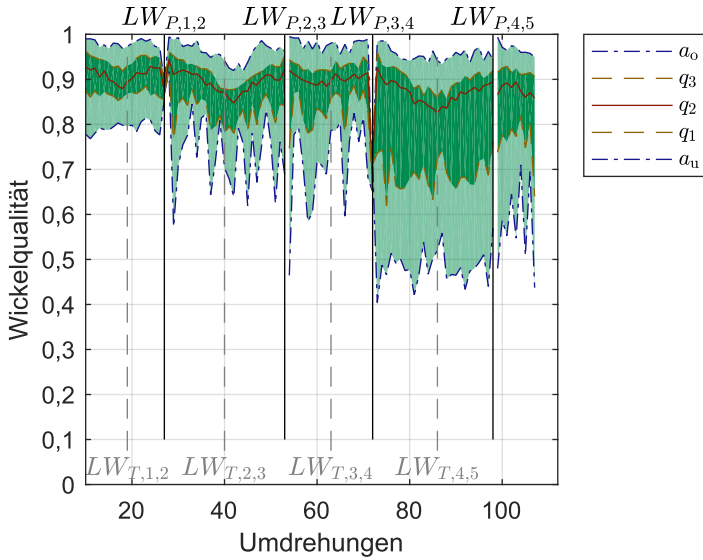


(a) Wickelszenario 1

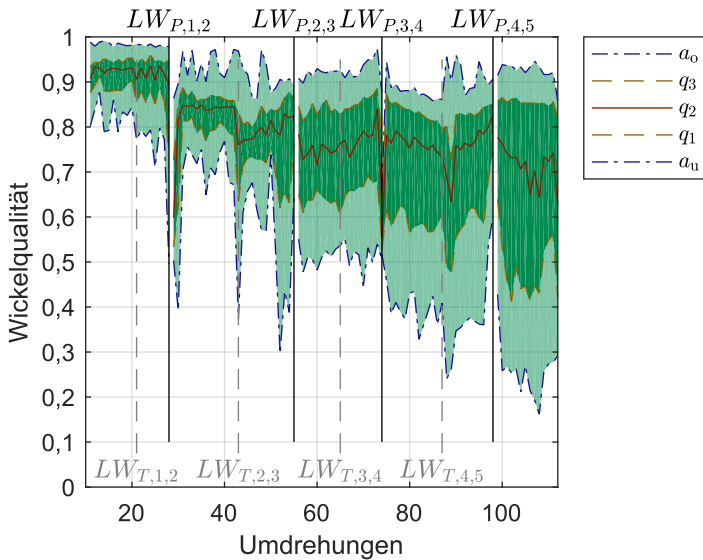


(b) Wickelszenario 2

Abb. 6.8: Boxplot der Wickelqualität verschiedener Wickelszenarien an der relativen Wickelsposition 0,0

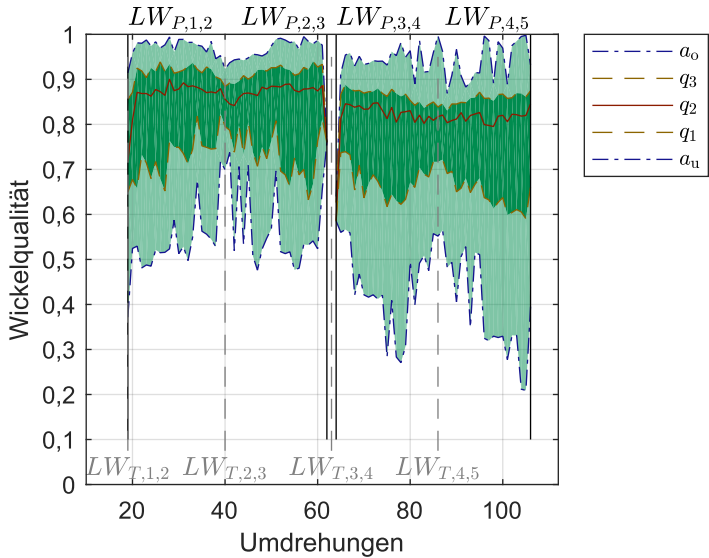


(a) Wickelszenario 1

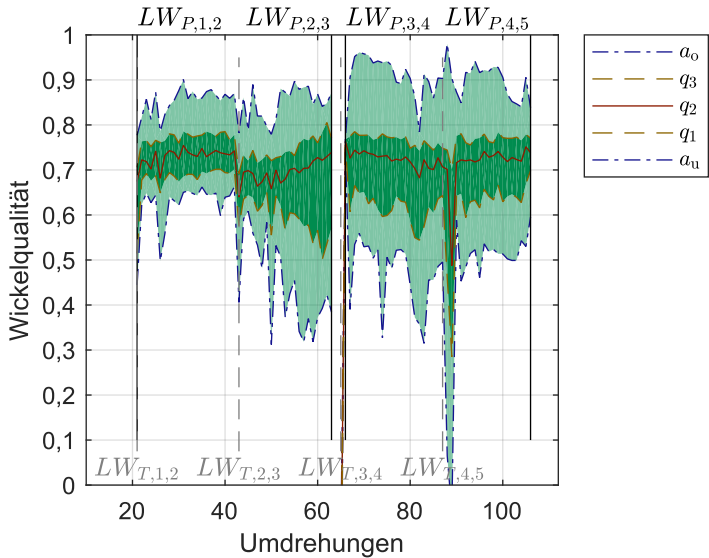


(b) Wickelszenario 2

Abb. 6.9: Boxplot der Wickelqualität verschiedener Wickelszenarien an der relativen Wickelposition 0,5

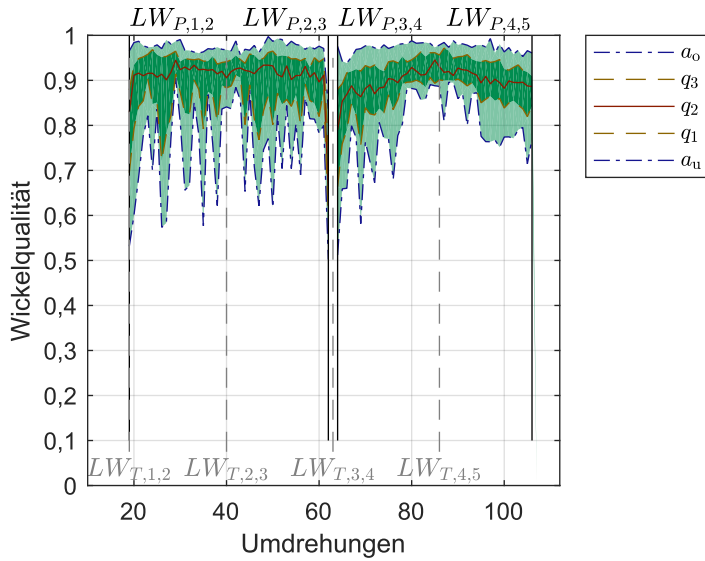


(a) Wickelszenario 1

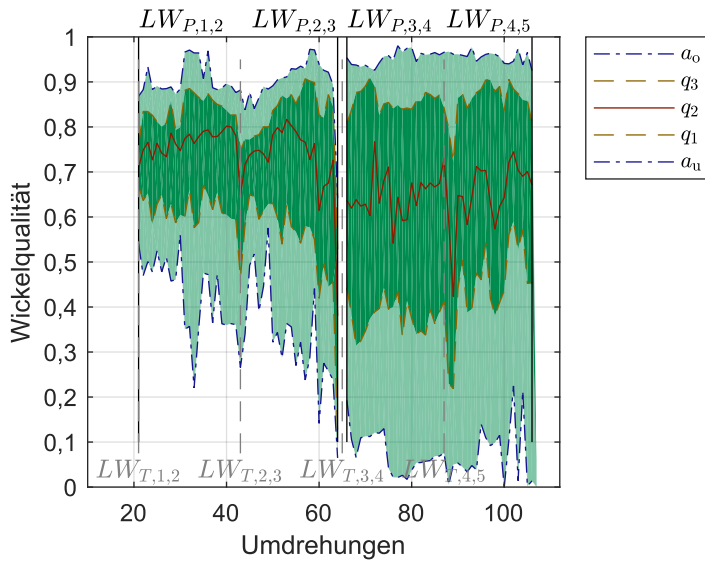


(b) Wickelszenario 2

Abb. 6.10: Boxplot der Wickelqualität verschiedener Wickelszenarien an der relativen Wickelposition 8,6



(a) Wickelszenario 1



(b) Wickelszenario 2

Abb. 6.11: Boxplot der Wickelqualität verschiedener Wickelszenarien an der relativen Wickelposition 9,1

dung die Möglichkeit, Veränderungen von Wickelparametern zu beobachten. Die Auswirkung von anderen Seilkräften bestimmter Lagen wird sichtbar und messbar gemacht. Durch das Werkzeug können Optimierungsschritte an Seil und / oder Seiltrommel vorgenommen und deren Wirkung quantifiziert werden.

6.2 Optimierung des Systems Seil - Seiltrommel

Dieses Kapitel enthüllt konkrete Hinweise zu Gestaltung von Seil und Trommel, um ein gutes Wickelverhalten sicherzustellen.

Das durch die AiF geförderte Verbundprojekt „Innovatives Wickelsystem für Seile aus Synthesefasern“ hatte das Ziel, Faserseile in der Mehrlagenwicklung nutzbar zu machen. Die Optimierung des Seils war Schwerpunkt des Projektpartners Institut für Fördertechnik und Kunststoffe der Technischen Universität Chemnitz (vgl. Seil 2.2 und Seil 2.3). Das Institut für Maschinenwesen (IMW) der Technischen Universität Clausthal hatte den Schwerpunkt der Optimierung der Trommel [SMS15].

Die im Folgenden vorgestellten Ergebnisse zur optimierten Trommelgeometrie wurden im Rahmen des Projektes am IMW erarbeitet.

6.2.1 Optimierung der Trommel

Für das Seil 2.2 wurde eine hinsichtlich des Wickelverhaltens optimierte Trommeloberfläche entwickelt. Die Ausgangsgeometrie dazu lieferte Trommel 2.1. Auf dieser Grundlage wurden die Rillen so angepasst, dass das Seil darin besser als im Vergleich zu einer Drahtseilrille gestützt wird.

Die Rillensteigung wurde vor der Durchführung der in Kapitel 3.3.1 beschriebenen Experimente festgelegt. Bezogen auf den sich im Wickelpaket einstellenden maximalen irreversiblen Durchmesser $d_{\max} = 14,84 \text{ mm}$ ergibt sich mit der Rillensteigung von $e = 16,2 \text{ mm}$ ein Rillungsverhältnis von

$$v_{e,d_{\max}} = \frac{e}{d_{\max}} = 1,092. \quad (6.1)$$

Das Verhältnis von maximalem Seildurchmesser zur Breite der Rillung ist damit größer als das für Drahtseile.

Der Auflaufkeil unterstützt analog zu dem von Drahtseiltrommeln den Übergang von der ersten zur zweiten Lage. Außerdem wurden an den Bordschei-

ben Geometrieelemente vorgesehen, die die Lücke der halben Umwicklung zwischen der letzten Umwicklung und der Bordscheibe füllen (Abb. 6.12). Diese begünstigen zudem die folgenden Lagenwechsel.

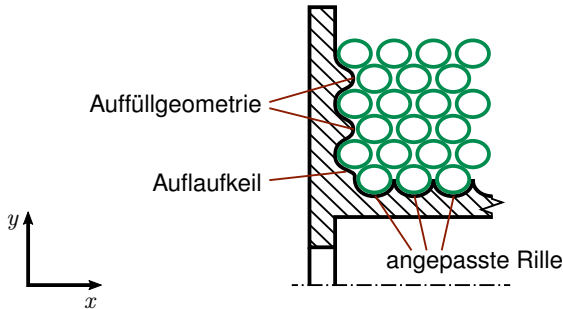


Abb. 6.12: Für Faserseil angepasste Trommeloberfläche

Während der Anpassung wurden die zusätzlichen Geometrieelemente in einem iterativen Prozess an die Wickelhöhe angepasst. Die Zusatzelemente wurden dazu additiv mittels Fused Deposition Modeling (FDM) gefertigt. Dies ermöglichte eine rasche Fertigung verschiedener Geometrievarianten. Durch diese Auffüllelemente konnte das Wickelverhalten des Seils optimiert werden. Im Ergebnis wurde dadurch die Trommeloberfläche an das vorhandene Seil angepasst.

In Abb. 6.13 ist die Rillung und die angeschraubte Auffüllgeometrie im Detail zu sehen.

Das Wickelergebnis ist in Abb. 6.14 zu sehen. Es zeigt über die gesamte Breite der Trommel ein geordnetes Wickelbild der fünften Lage.

Die bei der Wicklung durchgeführten Messungen zur Wickelhöhe sind im Vergleich zu den entsprechend Kapitel 4.2.2 durchgeführten Berechnungen in Abb. 6.15 zu sehen. Wie bei den anderen Berechnungen (vgl. Abb. 4.7 bis Abb. 4.12) zeigt das Modell mit Berücksichtigung der irreversiblen und reversiblen Deformation die beste Übereinstimmung zum Experiment.



(a) Rillung auf dem Trommel-
mantel

(b) Auffüllgeometrie an den Bordscheiben

Abb. 6.13: An Faserseil angepasste Oberflächengeometrie Trommel 2.2



Abb. 6.14: Gutes Wickelpaket Seil 2.2 auf Trommel 2.2

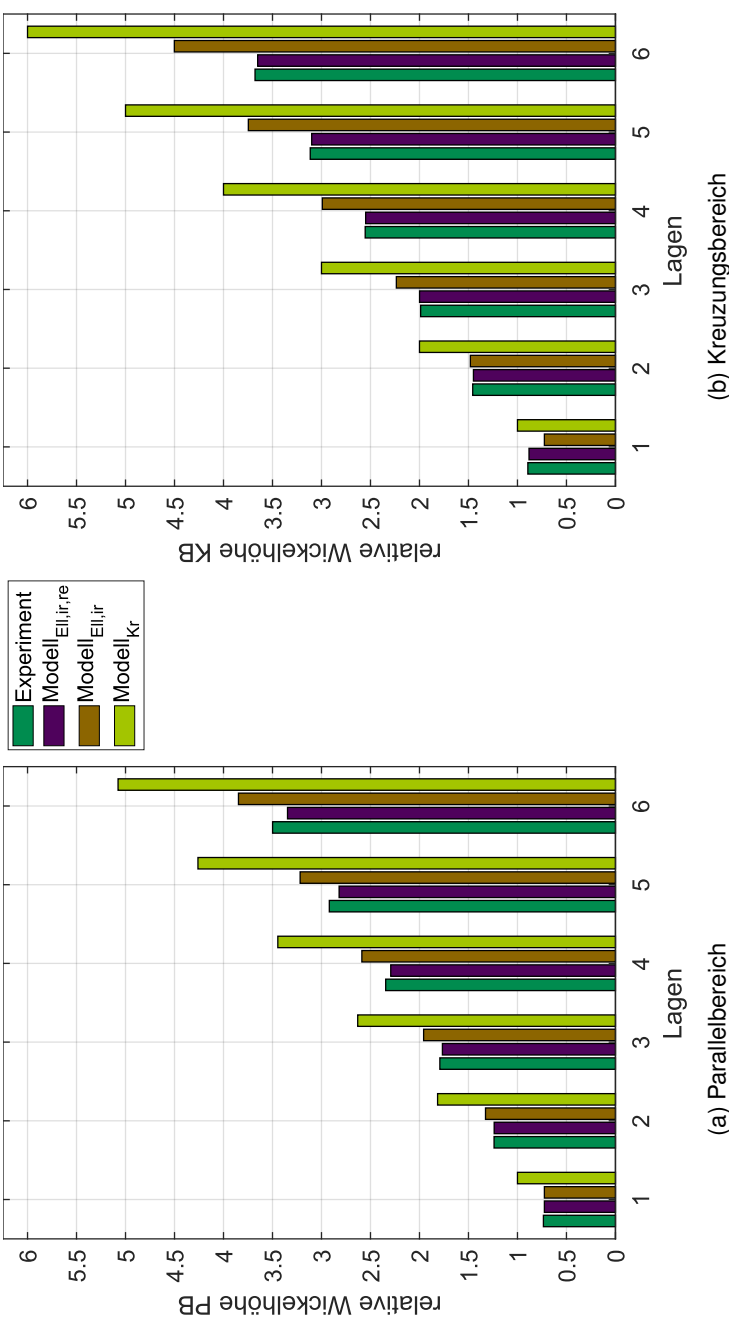


Abb. 6.15: Vergleich der relativen Wickelhöhe aus Experiment und verschiedener Modelle Seil 2.2: Ellipsen mit irreversibler und reversibler $_{Ell,ir,re}$, Ellipsen mit irreversibler $_{Ell,ir}$ und Kreise $_{Kr}$ (Nenndurchmesser) ohne Deformation

6.2.2 Optimierung des Seils

Die vorgestellten Ergebnisse des Wickelverhaltens zeigen bessere Resultate für Seile mit stabilem Querschnitt (Abb. 5.15 und Abb. 5.16). Das Seil 1.5 davon abweicht, hat mit der schlechteren Passgenauigkeit von maximalem Seildurchmesser zur Rillensteigung zu tun.

In Tab. 6.1 sind die Rillungsverhältnisse der durchgeführten Experimente angegeben (Gleichung (6.1)).

Tab. 6.1: Rillungsverhältnis Wickelversuche

Seil	$v_{e,d_{\max}}$
1.1	1,037
1.2	1.079
1.3	0.946
1.4	0.904
1.5	0.927
2.1	0.996
2.2	1.092

Das Rillungsverhältnis des Drahtseils 2.1 liegt nahe bei 1. Dies deckt sich mit einem zu erwartenden Wert um 1, da eine übliche Rillensteigung von $e = 1,05 \cdot d_n$ im Bereich der Toleranz des Seildurchmessers liegt (vgl. Kapitel 2.2.3). Damit ist auch für Faserseile ein Rillungsverhältnis von 1 als Ziel zu nehmen.

Das nicht optimale Wickelergebnis auf Trommel 1 neben den Bordscheiben liegt wie in Kapitel 5.1 beschrieben auch am großen Ablenkwinkel. Weiterhin wird im Folgenden der Einfluss des Rillungsverhältnisses betrachtet. Die Größenverhältnisse mit Werten die über 1 liegen haben sich bei den Faserseilen 1.1 und 1.2 negativ auf das Wickelverhalten ausgewirkt. Bei Seil 1.2 ist das Wickelergebnis über die ganze Trommelbreite aufgrund des zu großen Rillungsverhältnisses nicht zufriedenstellend. Bei Seil 1.1 ist das schlechte Ergebnis neben der Bordscheibe neben dem großen Ablenkwinkel auch noch auf das etwas zu große Rillungsverhältnis zurückzuführen (vgl. Abb. 5.1).

Das große Rillungsverhältnis im Fall von Seil 2.2 zeigte keinen negativen Effekt auf das Wickelverhalten. Das bessere Ergebnis wurde jedoch auch durch die

Auffüllgeometrie und den kleineren Ablenkwinkel begünstigt.

Bei Rillungsverhältnissen kleiner 1 hat sich bei allen Seilen gezeigt, dass sie nicht optimal in die Rille passen. Bei Seil 1.3 ist der Effekt am wenigsten stark zutage getreten. Dies liegt zum einen daran, dass das Rillungsverhältnis obwohl kleiner als 1 noch recht hoch ist. Auf der anderen Seite ist das Seil aufgrund des relativ weichen Querschnitts in der Lage, sich in die Rille einzupassen. Bei Seil 1.4 ist dies aufgrund des noch kleineren Rillungsverhältnisses nicht in dem Maße möglich. Das Seil 1.5 passt sich ebenfalls nicht optimal in die Rille ein. Hier ist der Grund zusätzlich zu dem kleinen Rillungsverhältnis im durch den zusätzlichen Kern erreichten stabilen Querschnitt zu suchen.

Bei der Optimierung eines Seildurchmessers an eine gegebene Rillung sind somit zwei Dinge zu beachten: Erstens sollte ein möglichst stabiler Querschnitt des Seils angestrebt werden. Dies kann beispielsweise durch stützende Elemente wie einen Mantel oder einen Kern erreicht werden. Zweitens muss das Rillungsverhältnis beachtet werden. Für Faserseile wird ein Wert zwischen 1 und leicht darunter für zielführend erachtet. Bei einem weicheren Querschnitt kann das Rillungsverhältnis etwas kleiner ausfallen als bei einem sehr stabilen Seilquerschnitt.

Eine Optimierung des Seilquerschnitts für eine gegebene Trommel bedeutet, dass bei gleichbleibender Seilkonstruktion und somit gleichbleibendem Deformationsverhalten der reale Seilquerschnitt angepasst werden muss. Dies hat dann auch Auswirkungen auf die Tragkraft des Seils.

Eine mögliche Anpassung des Seilquerschnitts an die vorliegende Deformation ist in Abb. 6.16 dargestellt. Wenn der Vergleichsdurchmesser eines runden Querschnitts konstant gehalten wird, stellt sich mit zunehmender Querschnittsdeformation theoretisch eine zunehmende Überschneidung der Umwicklungen ein (Abb. 6.16a, 6.16c, 6.16e und 6.16g). Aufgrund des konstanten Querschnitts liegt keine Verringerung der Tragkraft des Seils vor. Das Wickelverhalten des Seils verschlechtert sich jedoch mit abnehmender relativer Rundheit. Die Alternative ist in den Abb. 6.16b, 6.16d, 6.16f und 6.16g zu sehen. Der reale Querschnitt nimmt um den Faktor der relativen Rundheit ab. Auf der anderen Seite wird jedoch das Wickelverhalten konstant gehalten, da das Rillungsverhältnis ebenfalls konstant ist.

Entsprechend des vorgestellten Vorgehens ist für Seil 2.2 eine Rillensteigung

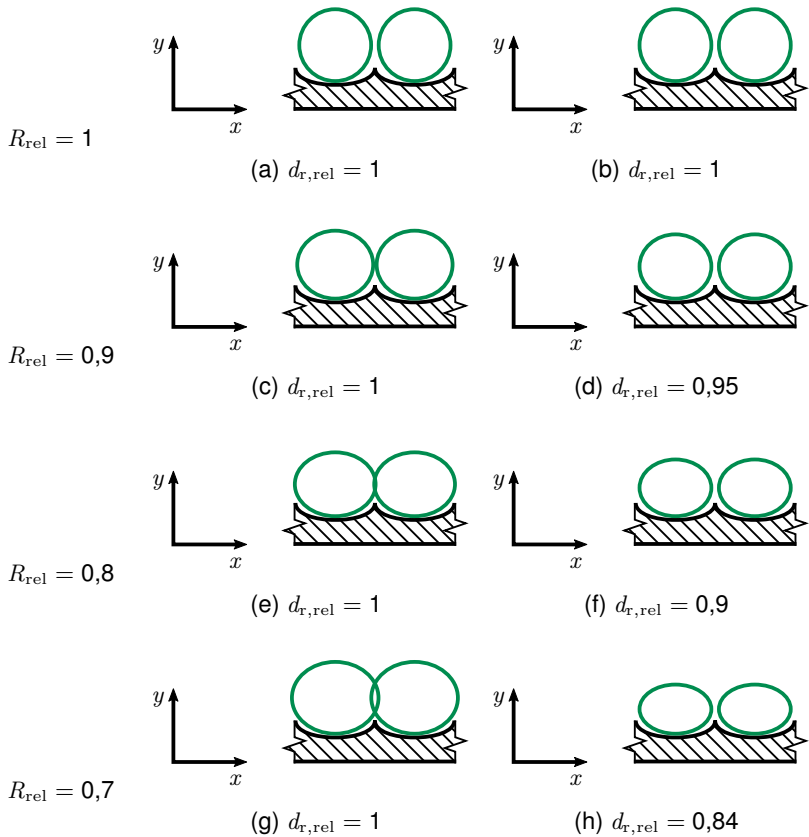


Abb. 6.16: Anpassung des Seildurchmessers an deformierten Seilquerschnitt

von $e = 14,9 \text{ mm}$ zu empfehlen.

Eine Verbesserung des Seils 2.2 hinsichtlich des Deformationsverhaltens liegt mit Seil 2.3 vor. Durch den zusätzlichen Mantel konnte die irreversible Deformation reduziert werden. Eine Optimierung für eine bestimmte Rillensteigung wurde nicht durchgeführt.

6.2.3 Ergebnis der Systemoptimierung

In den beiden vorherigen Kapiteln hat sich gezeigt, dass beide Systemkomponenten Seil und Trommel Optimierungspotenzial besitzen. Durch die Abstimmung der beiden Komponenten lässt sich für Faserseile ein gutes Wickelergebnis erzielen.

Sollen beide Komponenten angepasst werden, muss die Optimierung wechselseitig erfolgen. Beide Komponenten müssen auf den tatsächlich eingesetzten Partner abgestimmt sein. Wird die Trommel auf ein Seil angepasst und dieses anschließend auch verändert, passen diese gegebenenfalls wieder nicht gut zusammen. Sichtbar wird dies am Einsatz von Seil 2.3 auf Trommel 2.2 (Abb. 6.17). Die Trommel 2.2 ist auf Seil 2.2 abgestimmt. Der Einsatz des für sich optimierten Seils 2.3 ergibt demzufolge ein schlechteres Wickelergebnis.



Abb. 6.17: Faserseil 2.3 passt nicht zu Trommel 2.2

Durch die geringere Deformation von Seil 2.3 im Gegensatz zu Seil 2.2 passt es nicht zur Rillensteigung von Trommel 2.2. Dies zeigt sich an den weiß markierten KB in Abb. 6.17. Durch den zu kleinen maximalen Durchmesser wird die aktuelle Umwicklung zu spät von der vorherigen zur Seite geschoben. Dadurch erfolgt der weiß markierte KB jede Umwicklung ein bisschen später.

7 Zusammenfassung und Ausblick auf Anwendungen

Aus dem Stand der Technik wird in Kapitel 2 die Forschungsfrage entwickelt, wie Faserseil und mehrlagig bewickelte Seiltrommel optimal als System genutzt werden können und wie deren Kompatibilität sichergestellt wird. Anhand der vier daraus abgeleiteten Aufgaben wird nun die Frage beantwortet, ob die Forschungsfrage mit dem entworfenen Vorgehen in Abb. 7.1 beantwortet werden kann.

Wickelversuch

Zur **Analyse des Wickelpakets** wird aus mit Laser-Profil-Scanner (LPS) aufgezeichneten Wickelpaketen und der nachfolgenden Auswertung der Verlauf der Umwicklungen ermittelt. Das Ergebnis ist eine mathematische Beschreibung des Wickelverlaufs im dreidimensionalen Raum. Dieser gibt den Verlauf der im Untersuchungsbereich liegenden Umwicklungen wieder. Im Vergleich der Ergebnisse der verschiedenen untersuchten Seile sind deutliche Unterschiede zutage getreten. Auch Untersuchungen zur **Analyse des Seilquerschnitts** zeigen bei den Wickelversuchen deutliche Unterschiede zwischen den Seilen. Die mithilfe der LPS gemachten Aufnahmen zeigen je nach Seil unterschiedlich stark irreversibel deformierte Seilquerschnitte. Die irreversible Deformation wird mithilfe des Kennwertes der relativen Rundheit dem Verhältnis von minimalem und maximalem Seildurchmesser angegeben.

Querdruckversuch

Die **Analyse des Seilquerschnitts** wird mithilfe des am Institut für Maschinenwesen (IMW) bewährten Querdruckprüfstands fortgeführt. Die irreversible Seil deformation wird für ein großes Parameterfeld aus Seil- und Querkraften untersucht. Für dieselben Lastkombinationen wird ebenfalls die reversible Deformation in Form des Querelastizitätsmoduls ermittelt. Als Ergebnisse liegen das irreversible und das reversible Deformationsverhalten der untersuchten Seile in

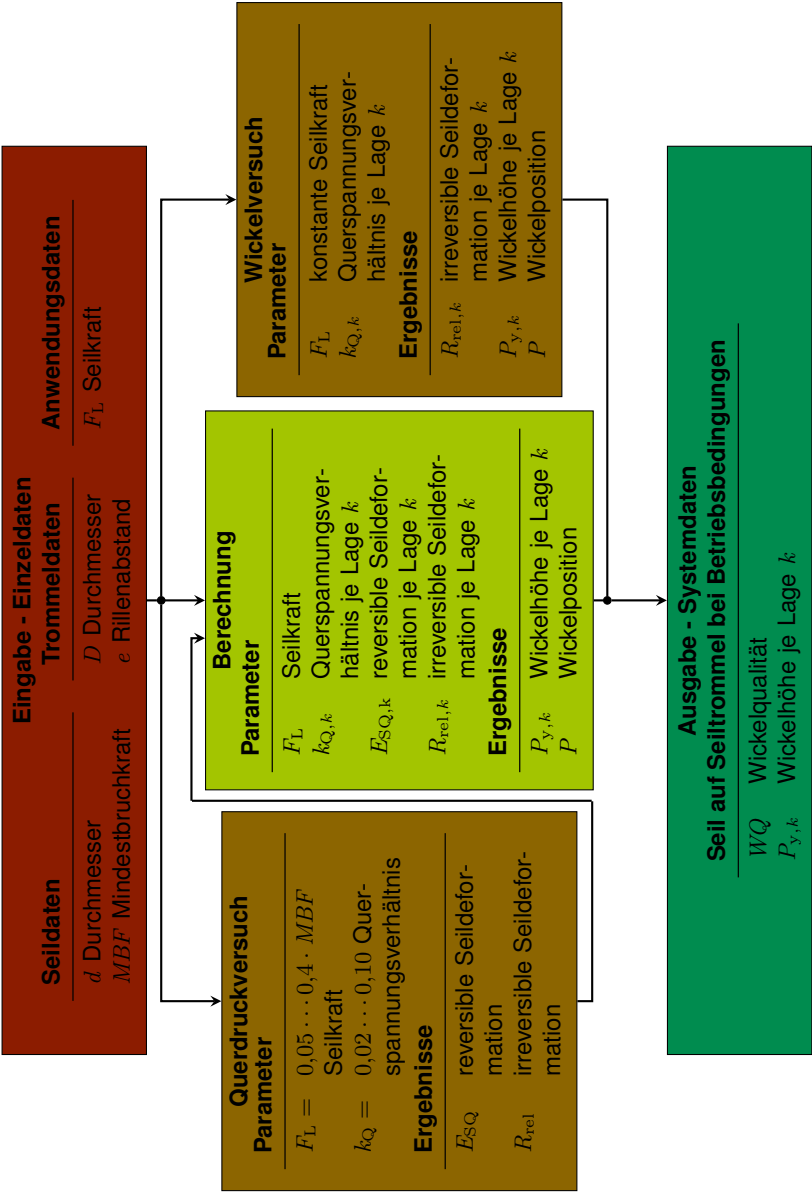


Abb. 7.1: Auslegung von Seilen und Trommeln für mehrlagig bewickelte Trommeln (Wiederholung Abb. 2.35)

Abhängigkeit der Seil- und der Querkraft vor.

Im Vergleich zwischen Wickel- und Querdruckversuch wird eine gute Übereinstimmung der relativen Rundheit aus beiden Versuchen festgestellt.

Berechnung

In Kapitel 4 wird aufbauend auf den Ergebnissen aus dem Querdruckversuch die **Berechnung des Wickelpaketes** durchgeführt. Die bekannte Berechnung des Manteldrucks liefert die Druckanteile, die auf jede Lage wirken. Dieser Druck lässt die irreversibel deformierten Seilquerschnitte weiter reversibel deformieren und dient damit zur Berechnung des sich abschließend einstellenden Wickelpaketes.

Auch der Vergleich der Messergebnisse der Wickelhöhen des Wickelversuchs mit deren Berechnungen zeigt eine gute Übereinstimmung.

Die **Berechnung der Wickelqualität** wird in Kapitel 5 beschrieben und bedient sich wiederum der vorherigen Ergebnisse. Der aus den Wickelversuchen ausgewertete Verlauf der Umwicklungen ist der Ist-Verlauf. Der Soll-Verlauf der Umwicklungen liegt durch die berechneten Positionen vor. Aus dem Abstand des Soll-Ist-Vergleichs wird die Wickelqualität abgeleitet. Diese kann nach unterschiedlichen Gesichtspunkten für das komplette Wickelpaket aber auch für einzelne Lagen oder Umwicklungen angegeben werden. Durch eine noch detailliertere Auflösung ist auch das Verhalten einzelner Umwicklungen während der weiteren Bewicklung messbar.

In Kapitel 6 wird abschließend erläutert, durch welche Maßnahmen eine gute Kompatibilität von Faserseil und Trommel erreicht werden kann. Eine Anpassung der Trommel wird durch Veränderungen an der Rillung und durch eine angepasst gestaltete Bordscheibengeometrie erreicht. Das Seil kann an eine gegebene Rillung durch die Veränderung des realen Seilquerschnitts angepasst werden. Diese Anpassung des Seilquerschnitts ist mithilfe der erarbeiteten Parameter zur Beschreibung des Seilquerschnitts möglich. Bestenfalls sollte angestrebt werden, beide Systemkomponenten wechselseitig aufeinander abzustimmen.

Insgesamt wird aufgezeigt, dass des Systems Seil – Seiltrommel durch die Auswertung von Wickelversuchen beschreibbar ist. Zudem ermöglicht das gezeigte Verfahren ein vereinfachtes Vorgehen mit Querdruckversuch und an-

schließender Berechnung. Durch diese Vereinfachung werden Ressourcen in der experimentellen Erprobung gespart. Weiterhin können verschiedene Konstruktionsvarianten ohne Experimente verglichen werden. Durch das gesamte vorgestellte Verfahren kann die Kompatibilität von Faserseil und mehrlagig bewickelter Seiltrommel durch die Analyse der Wickelqualität beschrieben und sichergestellt werden.

Die vorliegende Arbeit liefert einen Beitrag, um das Verhalten von Faserseilen unter Last insbesondere im Zusammenspiel mit mehrlagig bewickelten Seiltrommeln zu verstehen. Daraus ergeben sich weitere Anwendungsmöglichkeiten und Fragestellungen, die anschließend genannt werden.

In der Anwendung der vorgestellten Werkzeuge ist es wünschenswert, den untersuchten Bereich auf die gesamte Trommelbreite zu erweitern. Dies ist zum Teil schon erfolgt. Vor allem, wenn die Wickelqualität mit dem Ziel der Überwachung des Wickelprozesses eingesetzt wird, ist dies auch erforderlich. Bei dieser Überwachung aber auch im Labor ist es interessant, Veränderungen des Wickelverhaltens über einen längeren Zeitraum idealerweise über die gesamte Seillebensdauer zu erfassen. Dabei können Veränderungen in der Soll-Ist-Abweichung festgestellt und möglicherweise Aussagen zum Verschleiß des Seils gemacht werden. Gegebenenfalls können über Veränderungen im Wickelverhalten auch Abschätzungen zum aktuellen Zustand des Seils und damit Kriterien zur Erkennung der Abergereife erfolgen.

Aus Langzeitversuchen lassen sich mögliche Verbesserungen an der konkreten Berechnung der Wickelqualität ableiten. Beispielsweise kann es sinnvoll sein, die Abweichungen aus dem Soll-Ist-Vergleich nach verschiedenen Gesichtspunkten zu gewichten oder Abweichungen statt linear quadratisch zu berücksichtigen. Für eine Gewichtung müssten Abweichungen identifiziert werden, die einen schwerwiegendere Auswirkung auf das Wickelverhalten haben. Denkbar ist dabei, dass axiale Abweichungen oder eine negative radiale Abweichung durch Einschneiden mithilfe von solchen Gewichtungsfaktoren stärker berücksichtigt werden.

Eine andere Möglichkeit zur Anpassung und Verbesserung der Wickelqualität liegt in der direkten Berücksichtigung der Rillungsqualität. Dies entspräche der einzelnen Betrachtung des Seils auf der Trommel.

Die Rillungsqualität kann gegebenenfalls auch zu weiteren Analysezielen

eingesetzt werden. Es wäre zu überprüfen, inwieweit die in der Praxis an der Trommel auftretenden plastischen Deformationen durch die Auswertung der Rillungsqualität zu erfassen sind.

Damit verbunden ist die Frage nach der Belastung und der Beanspruchung der Trommel durch das mehrlagige Wickelpaket. So stellt sich die Frage, ob sich durch die Erweiterung der Trommelberechnung um die Ermittlung der tatsächlichen Wickelradien eine relevante Veränderung in der berechneten Trommelbelastung ergibt und ob derartige Effekte auch experimentell nachweisbar wären.

Literaturverzeichnis

- [AB88] ALMKVIST, Gert ; BERNDT, Bruce: Gauss, Landen, Ramanujan, the Arithmetic-Geometric Mean, Ellipses, π , and the Ladies Diary. In: *The American Mathematical Monthly*, 95 (1988), Nr. 7, 585–608.
<http://www.jstor.org/stable/2323302>
- [Alb35] ALBERT, Wilhelm August J.: Die Anfertigung von Treibseilen aus geflochtenem Eisendraht. In: *Archiv für Mineralogie, Geognosie, Bergbau und Hüttenkunde* (1835), S. 418–428
- [Alb37] ALBERT, Wilhelm August J.: Ueber Treibseile am Harz. In: *Archiv für Mineralogie, Geognosie, Bergbau und Hüttenkunde* 10 (1837), S. 215–234
- [AS1418.1] Norm AS 1418.1 2002. *Cranes, hoists and winches, Part 1: General requirements*
- [Bec69] BECHTLOFF, G.: Die Beanspruchung des Drahtseilquerschnittes unter Längslast und ebener Querpressung. In: *Draht-Welt* 55 (1969), Nr. 2-4, S. 80–87, 147–158, 196–203
- [Ber11] BERNER, Oliver R.: *Lebensdauer von Stahlseilen beim kombinierten Lauf über Treib- und Ablenkscheiben unterschiedlicher Rillenform*. 2011
- [CC19] CRAIG, R. ; CANNELL, D.: The reality of testing direct steel wire replacement with a fibre rope on a conventional drum winchmounted within a subsea utility crane. In: DOHM, M.A.R. (Hrsg.): *Exploring Opportunities - Synthetic/Steel*, 2019. – ISBN 978–1–7336004–0–8, S. 1–23

- [CM16] CONARD, Nicholas ; MALINA, Maria: Außergewöhnliche neue Funde aus den aurignacienzeitlichen Schichten vom Hohle Fels bei Schelklingen. In: LANDESAMT FÜR DENKMALPFLEGE STUTTGART (Hrsg.): *Archäologische Ausgrabungen in Baden-Württemberg 2015*. Stuttgart : Theiss Verlag GmbH & Co, 2016. – ISBN 978–3–8062–3375–9, S. 61–66
- [Cra] CRAWFORD, Alexander C.: *WINCH DRUMASSEMBLY AND METHOD FOR SPOOLING A LINE*. 11.03.2010
- [Cra14] CRAWFORD, Moya: AHC, Soft Rope Crane System. In: IMCA (Hrsg.): *IMCA Ropes Workshop: Are We Ready?*, 2014, S. –
- [Die71] DIETZ, Peter: *Ein Verfahren zur Berechnung ein- und mehrlagig bewickelter Seiltrommeln*. Düsseldorf : VDI-Verlag, 1971
- [Dij18] DIJKSTRA, Jeroen: ULTRA-DEEP SUBSEA CRANE WITH FIBER ROPE. In: IMCA (Hrsg.): *IMCA – Lifting and Rigging Seminar*, 2018, S. –
- [DIN15020-1] Norm DIN 15020 Blatt 1 02.1974. *Hebezeuge Grundsätze für Seiltriebe Berechnung und Ausführung*
- [DIN15061-2] Norm DIN 15061-2 08.1977. *Krane Rillenprofile für Seiltrommeln*
- [Din01] DINGENEN, JAN L. J. VAN: Gel-spun high-performance polyethylene fibres. (2001). ISBN 1 85573 539 3
- [DINEN12385-4] Norm DIN EN 12385-4 01.06.2008. *Drahtseile aus Stahldraht – Sicherheit – Teil 4: Litzenseile für allgemeine Hebezwecke; Deutsche Fassung EN 12385-4:2002+A1:2008*
- [DINEN13000] Norm DIN EN 13000 November 2014. *Krane – Fahrzeugkrane; Deutsche Fassung EN 13000:2010+A1:2014*

- [DINEN13135] Norm DIN EN 13135 Mai 2013. *Krane – Sicherheit – Konstruktion – Anforderungen an die Ausrüstungen; Deutsche Fassung EN 13135:2013*
- [DINEN13711] Norm DIN EN 13711 07.2002. *Fahrzeuge der Binnenschifffahrt Winden für den Schiffsbetrieb Sicherheitsanforderungen Deutsche Fassung EN 13711:2002*
- [DINEN13852-1] Norm DIN EN 13852-1 Januar 2014. *Krane – Offshore-Krane – Teil 1: Offshore-Krane für allgemeine Verwendung; Deutsche Fassung EN 13852-1:2013*
- [DINEN13852-2] Norm DIN EN 13852-2 März 2005. *Krane – Offshore-Krane – Teil 2: Schwimmende Krane; Deutsche Fassung EN 13852-2:2004*
- [DINEN14492-1a] Norm DIN EN 14492-1 05.2015. *Krane – Kraftgetriebene Winden und Hubwerke – Teil 1: Kraftgetriebene Winden; Deutsche und Englische Fassung prEN 14492-1:2015*
- [DINEN14492-1b] Norm DIN EN 14492-1 06.2010. *Krane – Kraftgetriebene Winden und Hubwerke – Teil 1: Kraftgetriebene Winden; Deutsche Fassung EN 14492-1:2006+A1:2009*
- [DINEN14492-2] Norm DIN EN 14492-2 08.2016. *Krane – Kraftgetriebene Winden und Hubwerke – Teil 2: Kraftgetriebene Hubwerke; Deutsche und Englische Fassung prEN 14492-2:2016*
- [DINENISO1968] Norm DIN EN ISO 1968 August 2005. *Faserseile und Tauwerk – Begriffe (ISO 1968:2004); Dreisprachige Fassung EN ISO 1968:2004*
- [DINENISO9554] Norm DIN EN ISO 9554 September 2018. *Faserseile – Allgemeine Festlegungen (ISO/DIS 9554:2018); Deutsche und Englische Fassung prEN ISO 9554:2018*
- [DINISO3078] Norm DIN ISO 3078 10.1988. *Schiffbau Ladewinden Identisch mit ISO 3078:1987*
- [DINISO3730] Norm DIN ISO 3730 12.2013. *Schiffbau und*

Meerestechnik – Verholwinden (Mooringwinden) (ISO 3730:2012)

- [DINISO6115] Norm DIN ISO 6115 09.1989. *Schiffbau Fischnetzwinden*
Identisch mit ISO 6115 : 1988

- [DINISO6555] Norm DIN ISO 6555 09.1989. *Schiffbau Hangerwinden*
Identisch mit ISO 6555 : 1988

- [DINISO7364] Norm DIN ISO 7364 08.1985. *Schiffbau Decksmaschinen*
Fallreepwinden Identisch mit ISO 7364 Ausgabe 1983

- [DNV-RP-H201] Norm DNV-RP-H201 11.2014. *Lifting appliances used in*
subsea operations NOVEMBER 2014

- [DNVNo.2.22] Norm DNV No. 2.22 10.2011. *Lifting Appliances*
OCTOBER 2011

- [EKM17] ERNST, B. ; KIRTH, R. ; MUPENDE, Y.: High strength fiber
ropes for cranes. In: DOHM, M.A.R. (Hrsg.): *Rope - Present*
and Future, 2017. – ISBN 978–0–9552500–4–0, S. 37–51

- [EM18] ERNST, Björn ; MUPENDE, Yvon: Hochfestes Faserseil als
Hubseil in Kranen mit Mehrlagenwicklung. In: WEH KING,
Karl-Heinz (Hrsg.): *6. Stuttgarter Seiltrage: Material,*
Anwendung & Prüfung, 2018. – ISBN
978–3–00–059115–0, S. 1–12

- [ER15] EIBAUER, Ulrich ; RAUCH, Daniel: *C#*
Schnittstellendokumentation. 2015

- [Erl19] ERLENDSSON, Hjörtur: *Hampiðjan Group Global*. [http://www.ervo-group.eu/np4/np4/%7B\\$clientServletPath%7D/?newsId=43&fileName=2018_06_14_ERVO_Malta.pdf](http://www.ervo-group.eu/np4/np4/%7B$clientServletPath%7D/?newsId=43&fileName=2018_06_14_ERVO_Malta.pdf).
Version: 2019

- [FEM5.016] Norm FEM 5.016 12.04.2013. - *Leitfaden -*
“Sicherheitsrisiken während der Erstellung und des
Transportes von Windkraft Anlagen”

- [FEM5.024] Norm FEM 5.024 31.08.2017. *Leitfaden- “Sicherer Einsatz*

von Hochfesten Faserseilen auf Fahrzeugkranen"

- [FV91] FEYRER, Klaus ; VOGEL, Wolfram: Hochfeste faserseile beim Lauf über Seilrollen. In: *Draht* 42 (1991), S. 814–818
- [FW18] FEYRER, Klaus ; WEHKING, Karl-Heinz: *FEYRER: Drahtseile: Bemessung, Betrieb, Sicherheit*. 3. Springer, 2018. – ISBN 978–3–642–54295–4
- [Has18] HASSLER: *Statistik im Bachelor-Studium*. Springer Fachmedien Wiesbaden, 2018. – ISBN 978–3–658–20964–3
- [Hat15] HATTON, Laura: Technical bulletin on fibre rope testing. In: *International cranes and specialized transport* (2015).
<https://www.khl.com/news/technical-bulletin-on-fibre-rope-testing/109011.article>
- [HC17] HUNTLEY, Elisabeth ; COTE, Martin: Synthetic Rope Installation, Trial and In-Situ Monitoring at Goldex Mine. (2017). ftp://ftp.mern.gouv.qc.ca/Public/Dc/Conferences_Quebec-Mines-2017/22%2011%202017%20AM/11h30_Whitehill.pdf
- [Hea01] HEARLE, J. W. S. (Hrsg.): *High-performance fibres*. Boca Raton and Cambridge, England : CRC Press, 2001. – ISBN 1 85573 539 3
- [Hei13] HEINZE, Thorsten: *Zug- und biegewechselbeanspruchte Seilgeflechte aus hochfesten Polymerfasern*. Chemnitz, Technische Universität Chemnitz, Dissertation, 2013
- [Hen99] HENSCHER, Jürgen: *Dimensionierung von Windentrommeln*. 1999
- [HGG15] HUNTLEY, E. ; GRABANDT, O. ; GAETAN, R.: Non-Destructive Test methods for high-performance synthetic rope. In: RIDGE, I. M. L. (Hrsg.): *Challenging rope applications*. Didcot, Oxfordshire, UK : Dr. I.M.L.

Ridge, 2015. – ISBN 978–0–9552500–5–7, S. 191–197

- [HM11] HEINZE, Thorsten ; MAMMITZSCH, Jens: Thermofixieren von Seilen aus hochfesten Synthesefasern. In: *Logistics Journal* (2011). http://dx.doi.org/10.2195/LJ2010{_}Not{_}Ref{_}Heinze. – DOI 10.2195/LJ2010_Not_Ref_Heinze

- [HSF16] HAGEDORN, Jürgen ; SELL-LE BLANC, Florian ; FLEISCHER, Jürgen: *Handbuch der Wickeltechnik für hocheffiziente Spulen und Motoren*. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2016.
<http://dx.doi.org/10.1007/978-3-662-49210-9>.
<http://dx.doi.org/10.1007/978-3-662-49210-9>. – ISBN 978–3–662–49209–3

- [HSL12] HEINZE, Thorsten ; STAHR, Konrad ; LOHRENGEL, Armin: Zum Verformungsverhalten von Faserseilen, Hebezeuge und Fördermittel. In: *Hebezeuge und Fördermittel* (2012), Nr. 400-402

- [ISO 16625] Norm ISO 16625 2011. *Cranes and hoists — Selection of wire ropes, drums and sheaves (Draft)*

- [ISO 7365] Norm ISO 7365 2012. *Shipbuilding and marine structures- Deck machinery - Towing winches for deep sea use*

- [ISO 9089] Norm ISO 9089 12.1989. *Marine structures - Mobile offshore units Anchor winches*

- [ISO16839] Norm ISO 16839 März 2011. *Determination of the compliance characteristics of steel wire ropes subjected to lateral load*

- [LHC11] LEE, Sang H. ; HAN, Song S. ; CHUNG, Samyong: DEVELOPMENT OF ULTRA LIGHTWEIGHT HOIST ROPE OF TOWER CRANE FOR SUPER SKYSCRAPER. In: *2011 Proceedings of the 28th ISARC, Seoul, Korea* (2011), 869–874. <http://www.iaarc.org/publications/fulltext/S25-5.pdf>

- [Lie] LIEBHERR-COMPONENTS BIBERACH GMBH: *Seiltrommel und Seilrolle für Faserseiltriebe*. 24.01.2011
- [LSE⁺17] LOHRENGEL, Armin ; SCHULZE, Martin ; ERLENDSSON, Hjörtur ; MAGNUSSON, Jon A. ; SMEETS, Paul ; TACKEN, Bart: The influence of high performance fibre rope designs on drum load and spooling performance in multi-layer drum equipment. In: DOHM, M.A.R. (Hrsg.): *Rope - Present and Future*, 2017. – ISBN 978–0–9552500–4–0, S. 95–116
- [LSSW15] LOHRENGEL, Armin ; STAHR, Konrad ; SCHULZE, Martin ; WÄCHTER, Martina: Innovative drum construction for multilayer winding with fibre ropes. In: RIDGE, I. M. L. (Hrsg.): *Challenging rope applications*. Didcot, Oxfordshire, UK : Dr. I.M.L. Ridge, 2015. – ISBN 978–0–9552500–5–7, S. 269–285
- [LSW] LOHRENGEL, Armin ; STAHR, Konrad ; WÄCHTER, Martina: *Seiltrommel und Seilwinde*. 13.03.2013
- [LSW11] LOHRENGEL, Armin ; STAHR, Konrad ; WÄCHTER, Martina: Safe use of hoisting drums wound with multiple layers of wire, hybrid, fibre and/or large diameter ropes. In: RIDGE, I. M. L. (Hrsg.): *Proceedings of the OIPEEC conference 2011*. Oxfordshire, UK : OIPEEC, 2011. – ISBN 978–0–9552500–3–3, S. 21–50
- [LSW13] LOHRENGEL, Armin ; STAHR, Konrad ; WÄCHTER, Martina: Simulation of fibre ropes and their effects on the strain scenario of multi-layer wound rope drums. In: RIDGE, I. M. L. (Hrsg.): *Simulating rope applications*. Didcot : I.M.L. Ridge, 2013. – ISBN 978–0–9552500–4–0, S. 141–157
- [LSW18] LOHRENGEL, Armin ; SCHULZE, Martin ; WÄCHTER, M.: Multi-layer drum winches within subsea hoisting cranes. (2018)
- [MHN04] MCKENNA, H. A. ; HEARLE, J. W. S. ; N. O'HEAR, N.: *Handbook of fibre rope technology*. CRC Press, 2004. – ISBN 0–8493–2588–9

- [Mic11] MICHAEL, Markus: *Beitrag zur Treibfähigkeit von hochfesten synthetischen Faserseilen*. Chemnitz, Technische Universität Chemnitz, Dissertation, 30.03.2011. <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bsz:ch1-qucosa-66744>
- [Mic14] MICRO-EPSILON MESSTECHNIK GMBH & Co. KG: *scanCONTROL 2600-100: QuickReference*. 2014
- [Mic17] MICRO-EPSILON MESSTECHNIK GMBH & Co. KG: *Automatische Wicklung von Glasfaserkabeln*. 2017
- [Mup01] MUPENDE, Yvon: *Beanspruchungs- und Verformungsverhalten des Systems Trommelmantel - Bordscheiben bei mehrlagig bewickelten Seiltrommeln unter elastischem und teilplastischem Werkstoffverhalten*. Göttingen : Cuvillier, 2001
- [MW06] MERZIGER, Gerhard ; WIRTH, Thomas: *Repetitorium der höheren Mathematik: [Bachelor, Diplom, Lehramt ; Fachhochschulen, Universitäten ; Ingenieure, Mathematiker, Physiker ; über 1200 Beispiele und Aufgaben]*. 5. Aufl. Springe : Binomi-Verl., 2006. – ISBN 3-923923-33-3
- [Nov17] NOVAK, Gregor: *Zur Abschätzung der Lebensdauer von laufenden hochmodularen Faserseilen*. Stuttgart, UNIVERSITÄT STUTTGART, Dissertation, 2017. <https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:bsz:93-opus-ds-96171>
- [Ott04] OTTO, Steffen: *Ein nicht-rotationssymmetrisches Belastungsmodell für die Ermittlung des Beanspruchungsverhaltens mehrlagig bewickelter Seiltrommeln*. 1. Aufl. Clausthal-Zellerfeld : Papierflieger, 2004. – ISBN 3-89720-703-6
- [PG07] PAPST, W. ; GREGOROVÁ, Eva: *Characterization of particles and particle systems: ICT Prague 2007*. (2007)

- [Sch11] SCHWARZER, Tim: *Beitrag zur Gestaltung und Dimensionierung von Windentrommeln bei mehrlagiger Bewicklung mit Kunststoff- und Hybridseilen*. 2011
- [Sch14] SCHULZE, Martin: *Die Bestimmung der Querelastizität von Draht- und Faserseilen: Die Methode am Institut für Maschinenwesen im Vergleich zum Normentwurf ISO 16 839-2*. Clausthal-Zellerfeld, TU Clausthal, Projektarbeit, 19.11.2014
- [Sch16] SCHULZE, Martin: Einsatz von Laser Profil Scannern bei der Mehrlagenwicklung von Seilen. In: *Mitteilungen aus dem Institut für Maschinenwesen der Technischen Universität Clausthal* 41 (2016), 113–126.
https://www.imw.tu-clausthal.de/fileadmin/Forschung/InstMitt/2016/Systementwicklung%2C_Veruchstechnik_und_Maschinenakustik/Einsatz.pdf. – ISSN 0947–2274
- [SEB 666221] Norm SEB 666221 März 1992. *Fördertechnik; Seiltrommeln; Anschlußmaße und technische Anforderungen*
- [SHM14] SCHMIEDER, Annett ; HEINZE, Thorsten ; MICHAEL, Markus: Schadensanalyse hochfester Faserseile. In: *Logistics Journal* (2014). http://dx.doi.org/10.2195/LJ{}_PROC{}_SCHMIEDER{}_DE{}_201411{}_01. – DOI 10.2195/LJ_PROC_SCHMIEDER_DE_201411_01
- [SLW18] SCHULZE, Martin ; LOHRENGEL, Armin ; WÄCHTER, Martina: *Faserseile auf mehrlagig bewickelten Seiltrommeln*. (September 2018). ISBN 978–3–945479–10–0
- [SMS15] STAHR, Konrad ; MAMMITZSCH, Jens ; SCHULZE, Martin: *Innovatives Wickelsystem für Seile aus Synthesefasern: Abschlussbericht zum durch die AiF geförderten Verbundprojekt: Förderkennzeichen VP2515317US1*. 2015
- [SP16] SCHMIDT, Valentin ; POTT, Andreas: Investigating the

effect of cable force on winch winding accuracy for cable-driven parallel robots. In: *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part K: Journal of Multi-body Dynamics* 230 (2016), Nr. 3, S. 237–241.
<http://dx.doi.org/10.1177/1464419315586517>. – DOI 10.1177/1464419315586517. – ISSN 1464–4193

[SS16] STOCKER, Toni C. ; STEINKE, Ingo: *Statistik: Grundlagen und Methodik*. De Gruyter, 2016. – ISBN 978–3–11–035389–1

[Sti9] STIESS, Matthias: *Mechanische verfahrenstechnik*. 3., vollst. neu bearb. Aufl. Berlin : Springer, 2009- (Springer-Lehrbuch). – ISBN 9783540325512

[SW14] SCHULZE, Martin ; WÄCHTER, Martina: Das Seil unter Querbelastung – Querelastizitätsuntersuchungen am IMW im Vergleich zur Norm ISO 16839. In: *Mitteilungen aus dem Institut für Maschinenwesen der Technischen Universität Clausthal* (2014), Nr. 39.
https://www.imw.tu-clausthal.de/fileadmin/Forschung/InstMitt/2014/Systementwicklung/Das_Seil_unter_Querbelastung.pdf. – ISSN 0947–2274

[SW18] SCHULZE, Martin ; WÄCHTER, Martina: Faserseile auf mehrlagig bewickelten Seiltrommeln. In: *Mitteilungen aus dem Institut für Maschinenwesen der Technischen Universität Clausthal* 43 (2018), 5–22.
https://www.imw.tu-clausthal.de/fileadmin/Forschung/InstMitt/2018/Konstruktion_und_Berechnung_von_Maschinenelementen/SW_18.pdf. – ISSN 0947–2274

[TAS] Norm TAS 12.2005. *Technische Anforderungen an Schacht- und Schrägförderanlagen*

[VDI 2500] Norm VDI 2500 04.1990. *Faserseile*

[Ver17] VERREET, Roland ; SCHULZE, Martin (Hrsg.): *Bordscheiben Dimensionierung: Mail*. 11.12.2017

- [Ver18a] VERREET, Roland: *Die Inspektion von Drahtseilen*.
http://seile.com/bro_dt/Bro_Inspektion_de.pdf.
Version: 2018
- [Ver18b] VERREET, Roland: *Eine kurze Geschichte des Drahtseils*.
http://seile.com/bro_dt/Bro_Geschichte_de.pdf.
Version: 2018
- [Ver18c] VERREET, Roland: *Nachträgliche Veränderungen des Seiltriebes*. seile.com/bro_dt/Bro_Veraenderung_des_Seiltriebs_de.pdf. Version: 2018
- [Ver18d] VERREET, Roland: *Ropes and reeving systems: The last 40 years*. http://seile.com/bro_engl/Bro_Last-40-Years_en.pdf.
Version: 2018
- [Ver18e] VERREET, Roland: *Spezialseile für mehrlagig bewickelte Seiltrommeln*.
http://seile.com/bro_dt/Bro_Mehrlagen_de.pdf.
Version: 2018
- [Ver18f] VERREET, Roland: *Über das Drehverhalten von Drahtseilen*.
http://seile.com/bro_dt/Bro_Drehverhalten_de.pdf.
Version: 2018
- [Vog98] VOGEL, Wolfram: Dauerbiegeversuche an gedrehten und geflochtenen Faserseilen aus hochfesten Polyethylenfasern. In: *Technische Textilien* 41 (1998), S. 126
- [Wei08] WEISKOPF, Ulrich: *Untersuchung zur Lebensdauer von Kranhubseilen in der Mehrlagenwicklung*. 2008
- [Zol] ZOLLERN ANTRIEBSTECHNIK: *Seilwinde mit Einschubplanetengetriebe*. http://www.zollern.de/fileadmin/Upload_Konzernseite/Downloads/Brochueren/Antriebstechnik/Seilwinde-Einschubplanetengetriebe.pdf

A Abbildungen zu Experimenten

Im Anhang finden sich Abbildungen mit Ergebnissen der weiteren Seile zu Kapitel 3.

A.1 Abbildungen zum Seilquerschnitt im Querdruckversuch

Abbildungen Seildurchmesser der weiteren Seile zu Abb. 3.50.

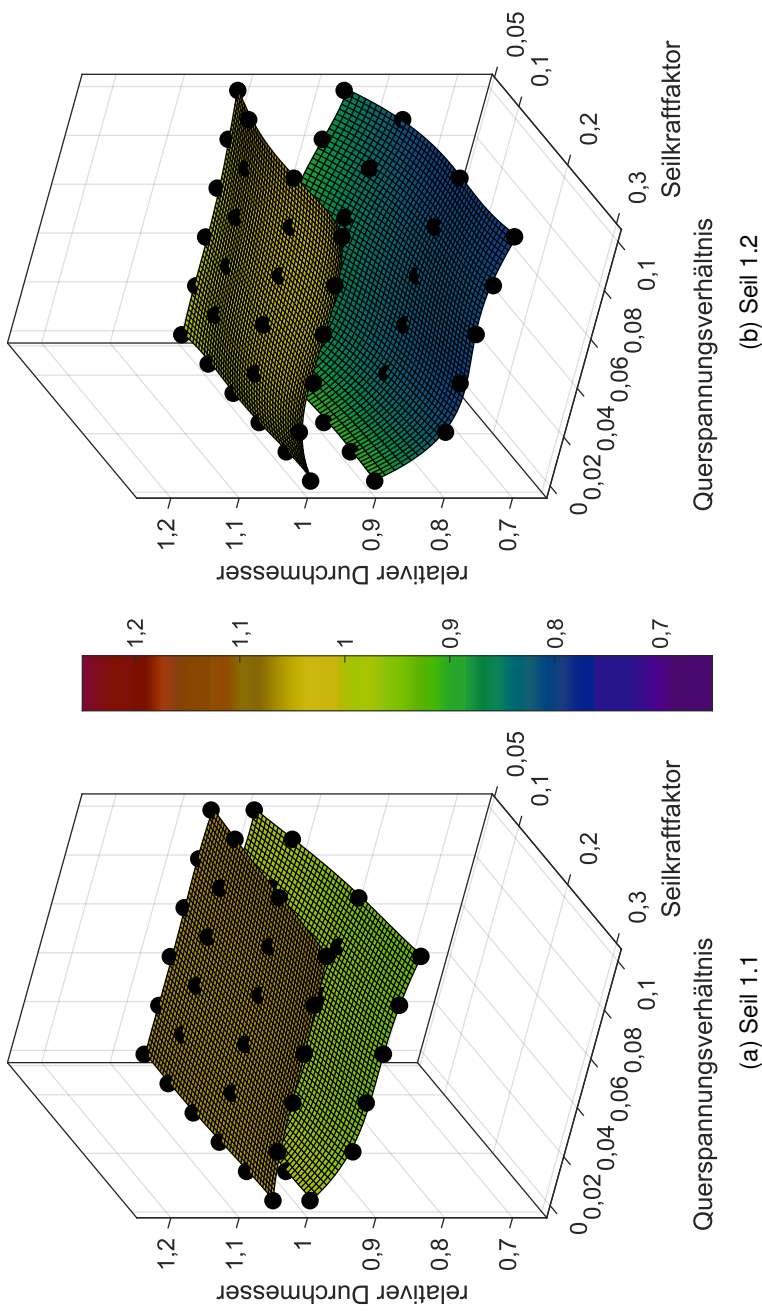


Abb. A.1: Seildurchmesser d_{\max} und d_{\min} in Abhängigkeit der Seilkraft und des Querspannungsverhältnisses

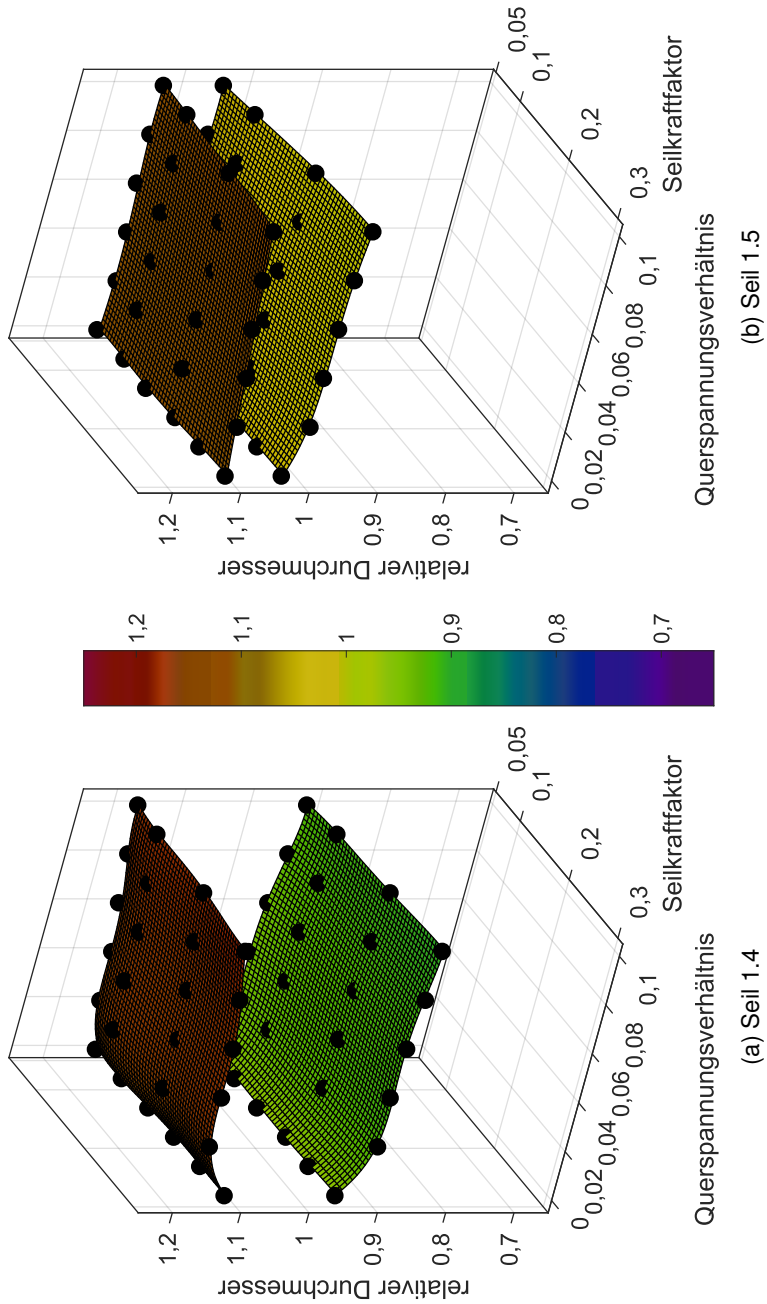


Abb. A.2: Seildurchmesser d_{\max} und d_{\min} in Abhängigkeit der Seilkraft und des Querspannungsverhältnisses

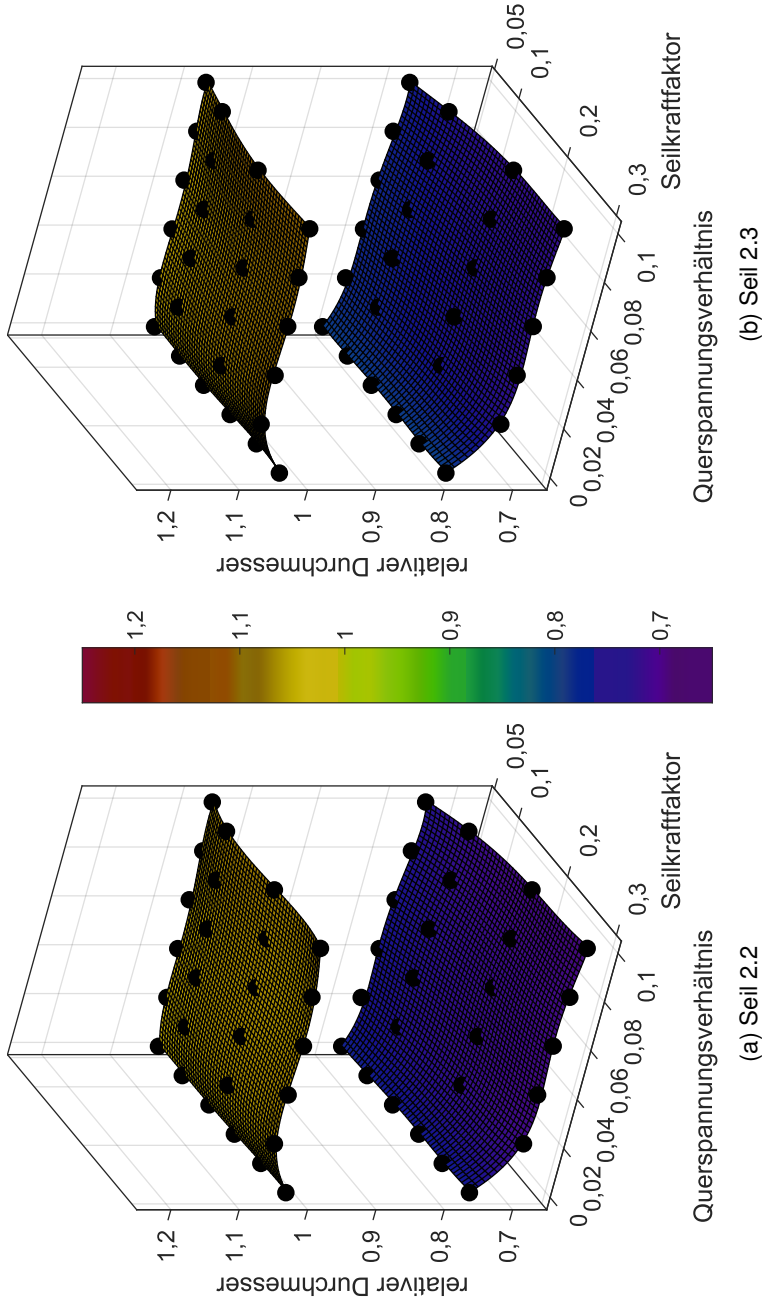


Abb. A.3: Seildurchmesser d_{\max} und d_{\min} in Abhängigkeit der Seilkraft und des Querspannungsverhältnisses

A.2 Relative Rundheit im Querdruckversuch

Abbildungen relative Rundheit der weiteren Seile zu Abb. 3.51.

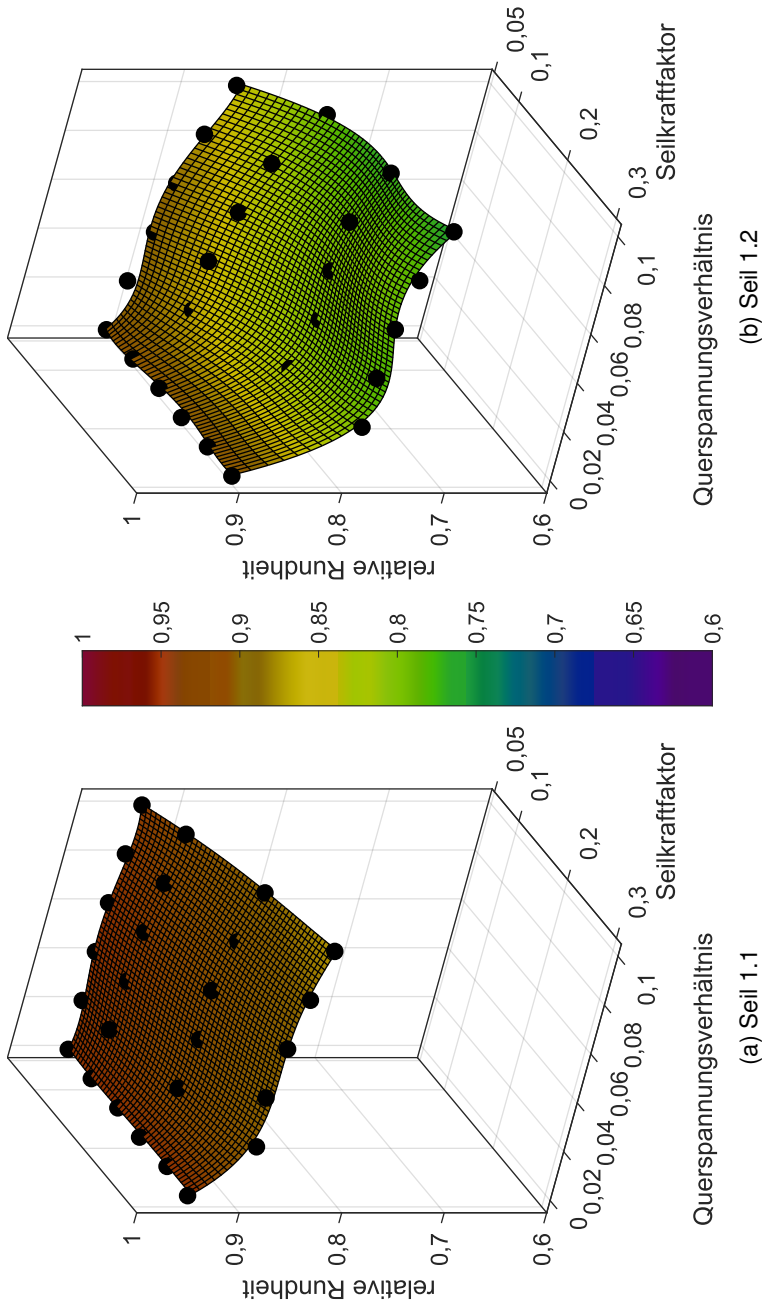
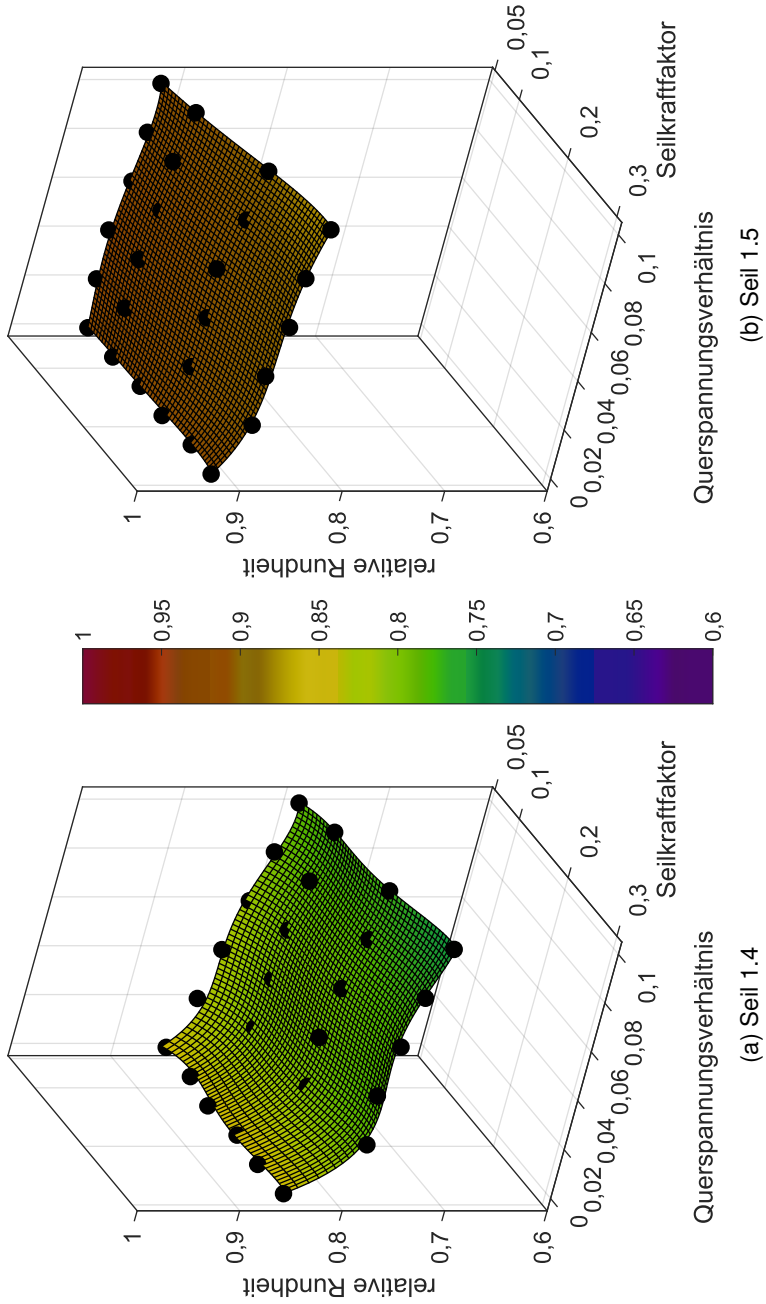


Abb. A.4: Relative Rundheit R_{rel} in Abhängigkeit der Seilkraft und des Querspannungsverhältnisses

Abb. A.5: Relative Rundheit R_{rel} in Abhängigkeit der Seilkraft und des Querspannungsverhältnisses

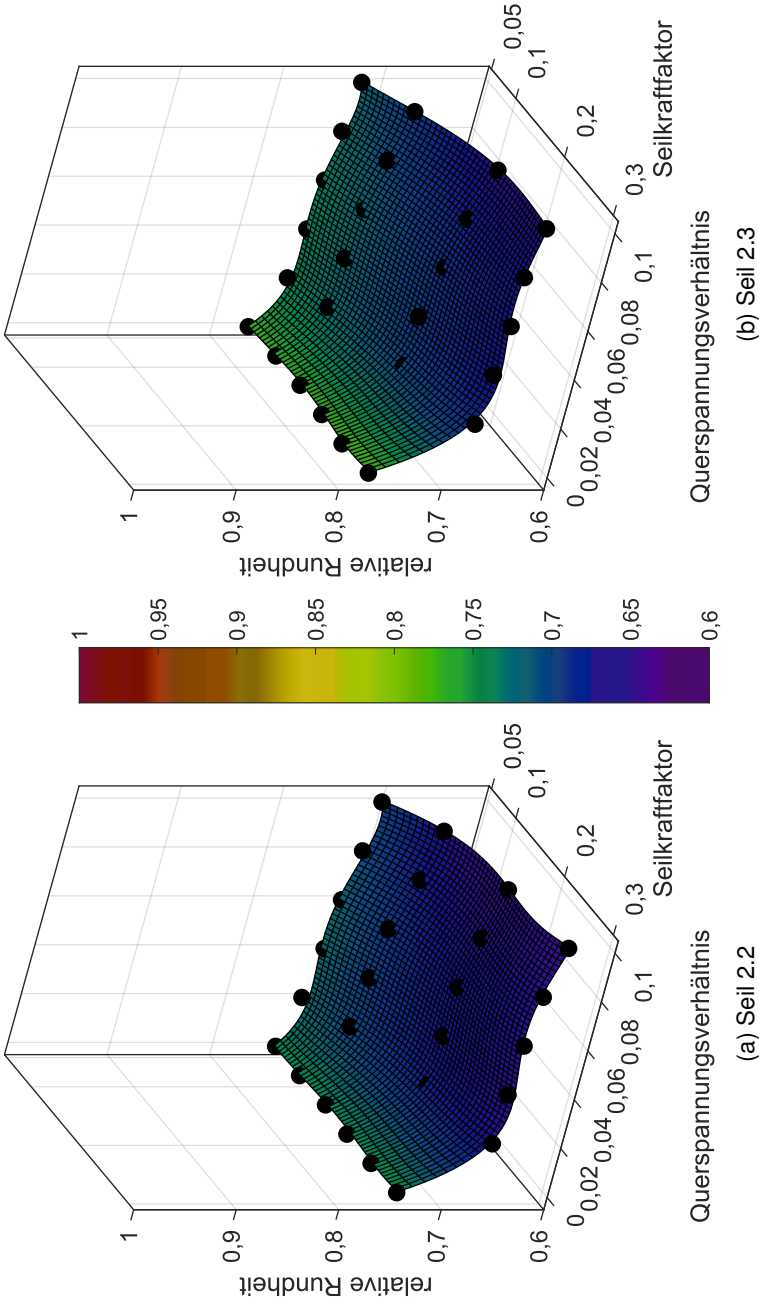
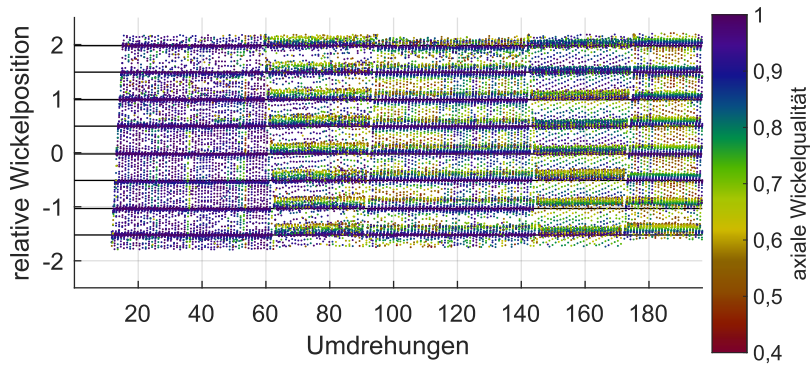


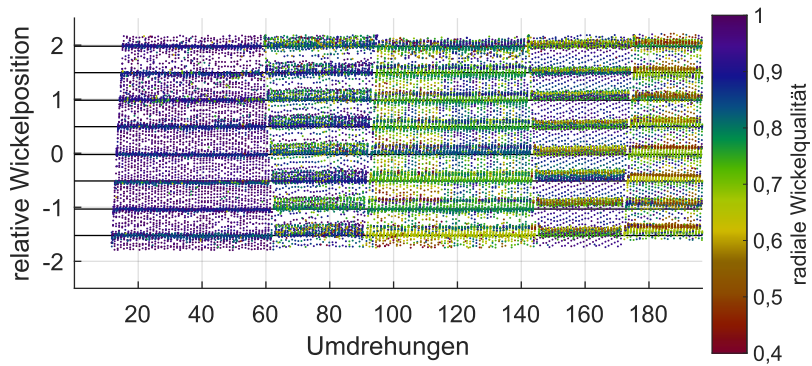
Abb. A.6: Relative Rundheit R_{rel} in Abhängigkeit der Seilkraft und des Querspannungsverhältnisses

A.3 Abbildungen zur Wickelqualität

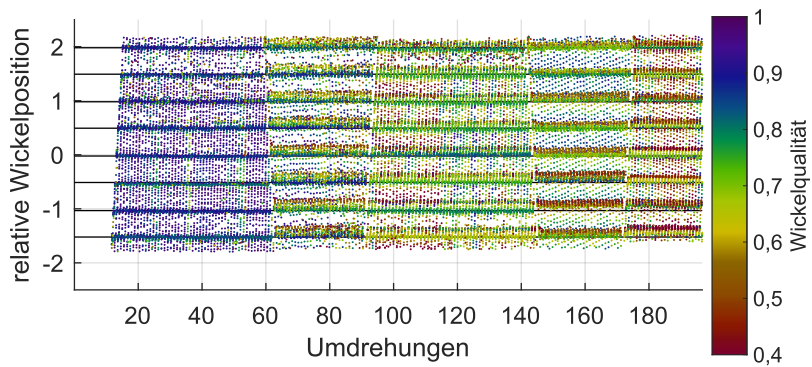
Heatmaps weitere Seile zu Abb. 5.8.



(a) Axiale Wickelqualität

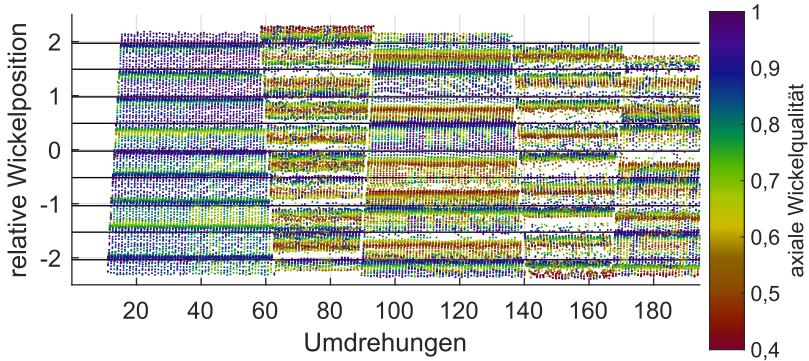


(b) Radiale Wickelqualität

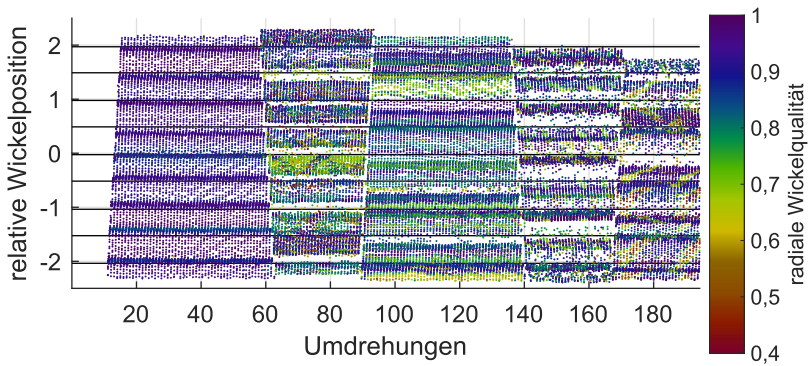


(c) Wickelqualität

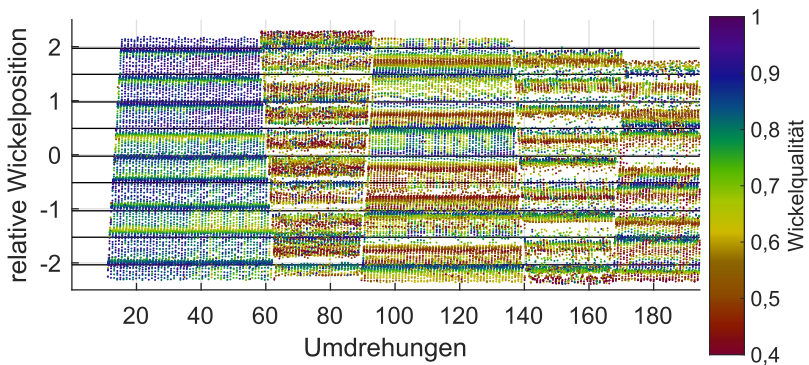
Abb. A.7: Heatmap Wickelqualität Seil 1.1



(a) Axiale Wickelqualität

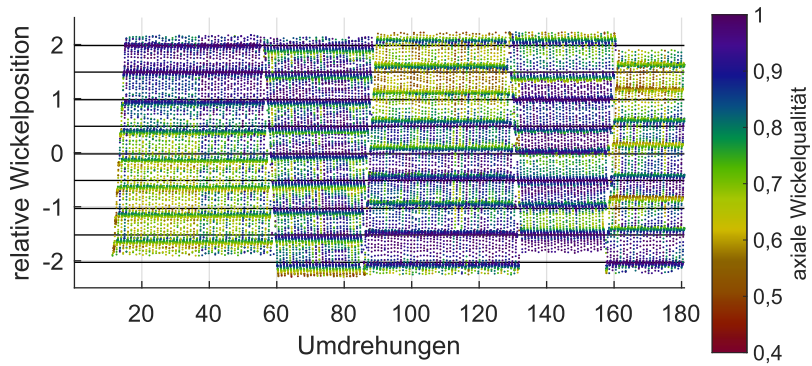


(b) Radiale Wickelqualität

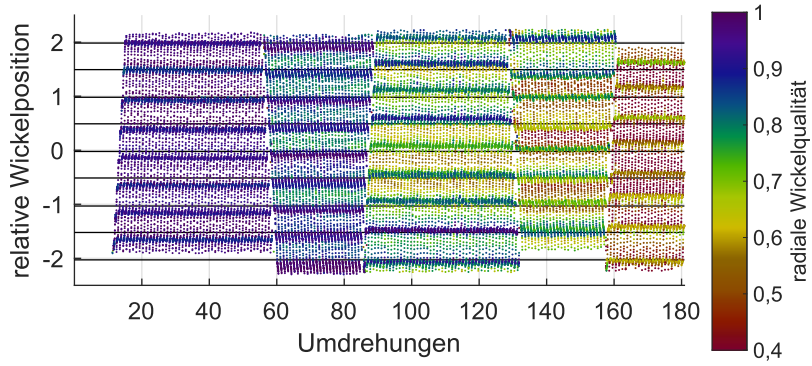


(c) Wickelqualität

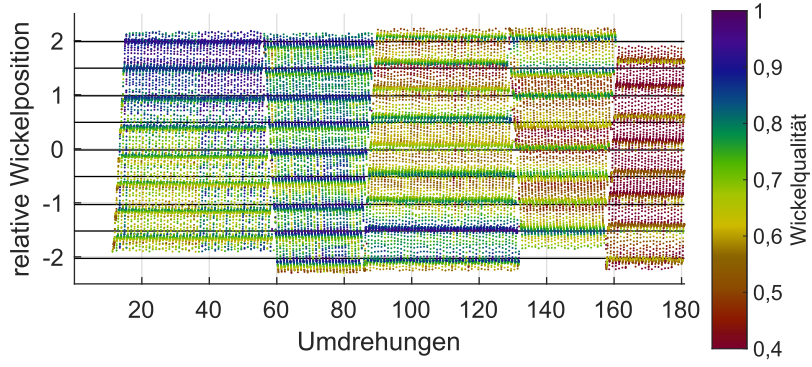
Abb. A.8: Heatmap Wickelqualität Seil 1.2



(a) Axiale Wickelqualität



(b) Radiale Wickelqualität



(c) Wickelqualität

Abb. A.9: Heatmap Wickelqualität Seil 1.4

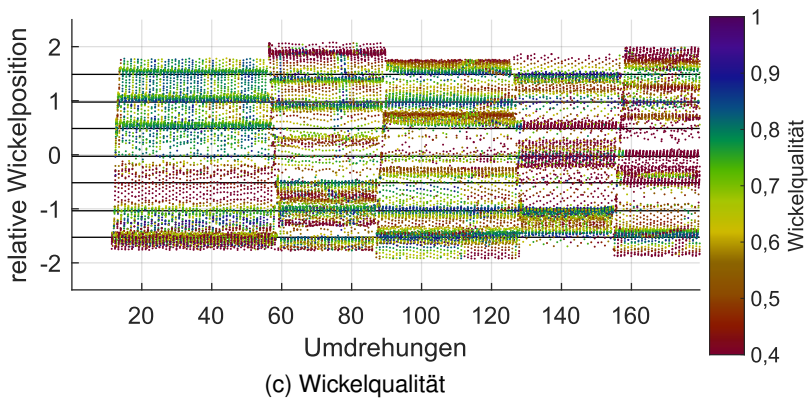
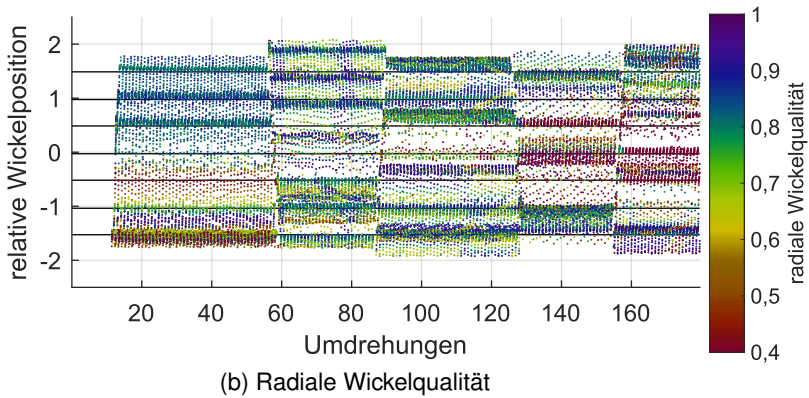
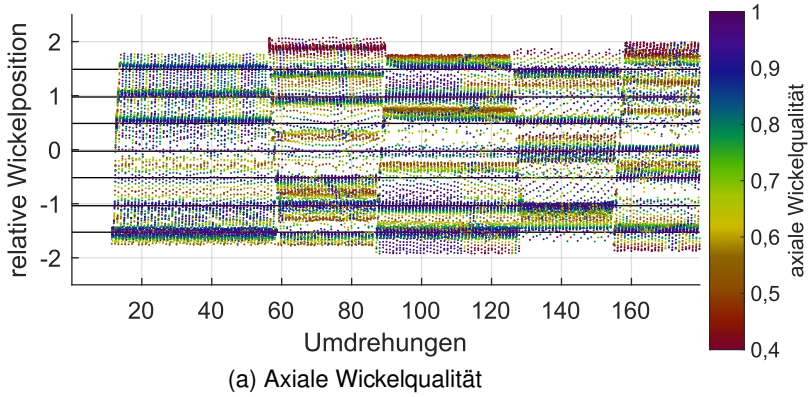
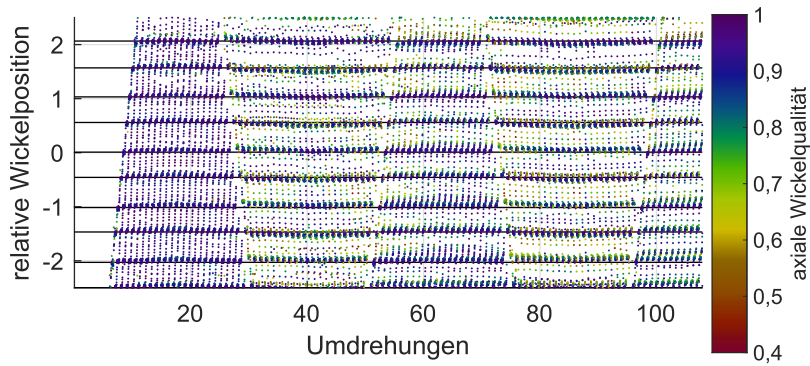
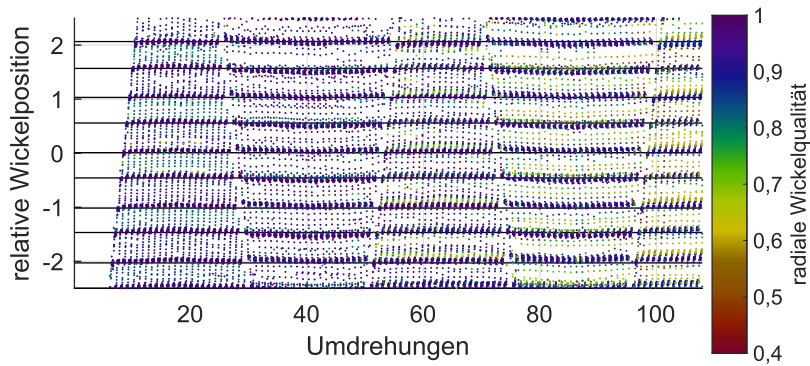


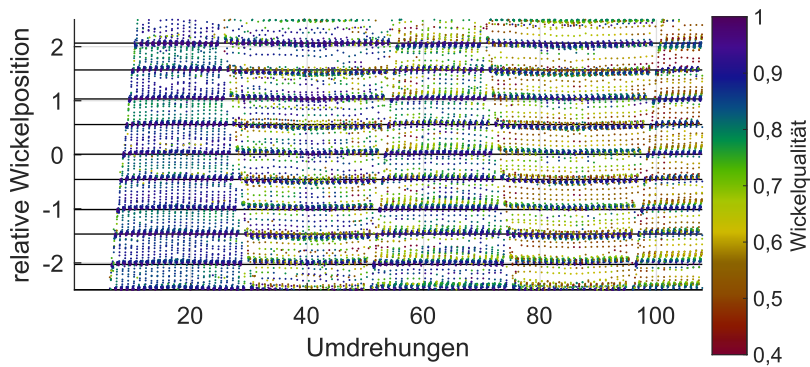
Abb. A.10: Heatmap Wickelqualität Seil 1.5



(a) Axiale Wickelqualität



(b) Radiale Wickelqualität



(c) Wickelqualität

Abb. A.11: Heatmap Wickelqualität Seil 2.1